

533 955
10/533'955

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2004 年 5 月 21 日 (21.05.2004)

PCT

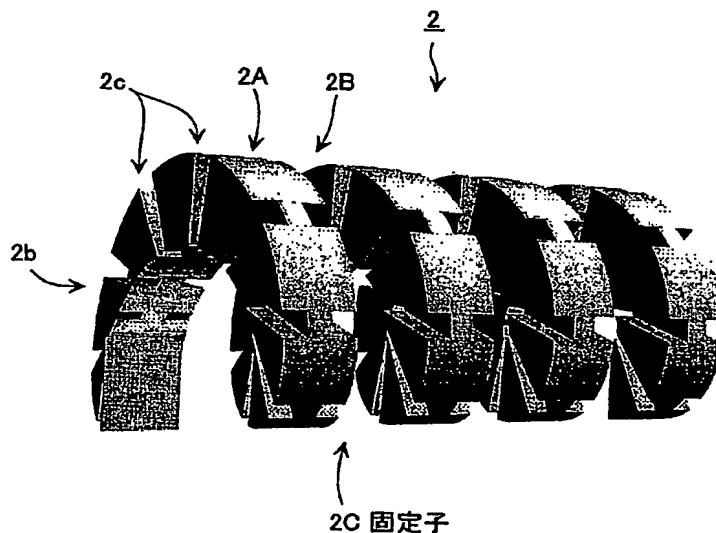
(10) 国際公開番号
WO 2004/042902 A1

- (51) 国際特許分類⁷: H02K 41/03 (72) 発明者; および
(75) 発明者/出願人 (米国についてののみ): 藤本 康孝 (FUJIMOTO, Yasutaka) [JP/JP]; 〒221-0802 神奈川県 横浜市神奈川区 六角橋6-24-2-202 Kanagawa (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2003/013646
- (22) 国際出願日: 2003 年 10 月 24 日 (24.10.2003) (74) 代理人: 塩野入 章夫 (SHIONOIRI, Akio); 〒251-0024 神奈川県 藤沢市 鶴沼橋1丁目1番4号 藤沢セントラルビル6階 Kanagawa (JP).
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2002-320965 2002 年 11 月 5 日 (05.11.2002) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): よこはまティーエルオー株式会社 (YOKOHAMA TLO COMPANY, LTD.) [JP/JP]; 〒240-8501 神奈川県 横浜市保土ヶ谷区 常盤台79番5号 Kanagawa (JP).
- (81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM,

[続葉有]

(54) Title: SPIRAL LINEAR MOTOR

(54) 発明の名称: スパイラル型リニアモータ



2C...STATOR

(57) Abstract: A motor producing a rectilinear drive force can simultaneously have the features of being small and light-weighted, excellent in accuracy, and having a large propulsion force. In a spiral-type linear motor (1), a rotator (3) and a stator (2) are both constructed in a spiral shape. When both spirally shaped portions are combined with each other, the motor produces an axial propulsion force as they spirally rotate. Forming both portions in a spiral shape can provide a large propulsion force equivalent to that available from a speed reducing gear. Further, a large propulsion force can be obtained by using a large area where the rotor and the stator face each other in an axial direction.

[続葉有]

BEST AVAILABLE COPY

WO 2004/042902 A1



AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許
(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,
GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),
OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW,
ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

— 補正書・説明書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される
各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語
のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約: 直進駆動力を発生するモータにおいて、小型軽量、高精度、高推力の各点を同時に備えることができる。スパイラル型リニアモータ1は、回転子3及び固定子2を共にらせん状に構成し、両らせん状部分を互いに組み合わせるにより、らせん状に回転しながら軸方向に推力を発生する。らせん状とすることにより減速ギヤと同様に高推力を得ることができ、また、回転子と固定子の軸方向に対向する大きな面積を利用することにより高推力を得ることができる。

スパイラル型リニアモータ

5 技術分野

本発明は、固定子に対して回転子が軸方向に直動するスパイラル型リニアモータに関する。

背景技術

- 10 NC機械など、外力を受けながら精密な位置決めを行う場合、大きな推力と高い剛性が必要となる。この大きな推力を得るにはギヤによりモータの出力を減速する方法と、大きな磁界を利用するダイレクトドライブ方式が知られている。

- 15 ギヤによりモータの出力を減速することにより大きな推力を得る場合には、ギヤによりクーロン摩擦力が位置決め精度に大きく影響するという問題があり、また、ダイレクトドライブ方式により大きな推力を得る場合には、装置が大型になるという問題がある。

- 特に直動型のアクチュエータの場合には、ギヤを用いた方式として回転型のモータとボールねじを組み合わせた構成が知られているが、回転型のモータとボールねじを組み合わせる構成は位置決め精度の問題の他、装置が複雑になるという問題がある。また、ダイレクトドライブ方式による直動型のアクチュエータとしては、リニアモータを利用した構成が知られている。
- 20

- また、直進駆動力を発生するモータとして、円筒状表面にN極とS極とをらせん状に交互に等間隔で着磁して回転子とし、軸方向に対して垂直平面上に周囲を囲むように電磁コイルを配置して固定子
- 25

とするスパイラルモータが提案されている。例えば、このようなスパイラルモータとして特開平 9-56143 号が提案されている。

従来のモータ構成では、大きな推力を得るには、装置が複雑になるという問題がある。また、上記文献に提案されるスパイラルモータでは、推力は電磁コイルと回転子の外周面との対向面積に依存するため、大きな推力を得ることが困難であるという問題がある。

したがって、従来、直進駆動力を発生するモータとして知られる構成では、小型軽量、高精度、高推力の各点を同時に備えることができないという問題がある。

そこで、本発明は前記した従来の問題点を解決し、直進駆動力を発生するモータにおいて、小型軽量、高精度、高推力の各点を同時に備えることができることを目的とする。

発明の開示

本発明は、回転運動を並進運動に変換するねじの機構と電磁力による動力機構とを一体化することにより、小型軽量、高精度、高推力の各点を同時に備える直動モータを構成するものである。

本発明は、ねじ機構を電磁力により非接触とすることにより摩擦による影響を排除し、これにより高精度の位置決め制御が可能となる。また、電磁力を作用させるねじ機構部分の面積を大きくとることができるため磁束を有効に利用することができ、同一体積、同一重量の従来のリニアモータよりも大きな推力を得ることができる。

本発明のスパイラル型リニアモータは、回転子及び固定子を共にらせん状に構成し、両らせん状部分を互いに組み合わせることにより、らせん状に回転しながら軸方向に推力を発生するものであり、らせん状とすることにより減速ギヤと同様に高推力を得ることがで

き、また、回転子と固定子の軸方向に対向する大きな面積を利用することにより高推力を得ることができる。

また、回転子及び固定子のピッチを小さくすることにより高回転型となり、小型軽量とすることができる。

- 5 また、回転子と固定子との間は非接触であるため、摩擦による影響を少なくして高精度の位置決めが可能となる。

本発明のスパイラルモータは、中心軸とこの中心軸の外周に設けたらせん状部とを備える回転子と、回転子と同ピッチのらせん状の中空磁極を備える固定子とを備えた構成とし、回転子の中心軸を固定子の中空磁極内に配置する。そして、回転子のらせん状部を固定子の中空磁極のらせん状の溝内においてらせん状に回転自在とし、回転子を固定子に対してらせん状に回転しながら軸方向に直動させる。

10

この構成によるスパイラル型リニアモータでは、らせん状に形成された固定子の溝内を、同じくらせん状に形成された回転子のらせん状部をらせん状に回転しながら、ねじ機構と同様に軸方向に直動する。

15

本発明のスパイラル型リニアモータの回転子は、回転子のらせん状部のらせん側面に永久磁石を備える。また、本発明のスパイラル型リニアモータの固定子は、中空磁極のらせん状の両側面に互いに90度位相をずらした2相の巻き線を軸方向に巻回する。また、固定子は、中空磁極のらせん状の両側面に凹凸部を備え、この凹凸部に巻き線を巻回する。

20

本発明のスパイラル型リニアモータのトルク及び推力は、回転子と固定子の互いに対向する磁極のらせん状側面間で交差する電磁力により発生し、それぞれ独立して制御することができる。

25

図面の簡単な説明

第 1 図は本発明のスパイラル型リニアモータの固定子の概略構成を示す図であり、第 2 図は本発明のスパイラル型リニアモータの巻き
5 線を巻回した状態の固定子の概略図であり、第 3 図は本発明の固定子に巻かれる 2 相の巻き線の位相状態を説明するための図であり、第 4 図は本発明の固定子の作成手順の一例を説明するための概略図であり、第 5 図は本発明のスパイラル型リニアモータの回転子の概略構成を示す図であり、第 6 図は本発明の回転子を軸方向に投影した図
10 であり、第 7 図は本発明の回転子の作成手順の一例を説明するための概略図であり、第 8 図は本発明の固定子に回転子を組み込んだ状態を外側から見た図であり、第 9 図は本発明の固定子に回転子を組み込んだ状態を示す図であり、第 10 図は本発明のスパイラル型リニアモータの縦断面図であり、第 11 図は本発明のスパイラル型リニアモータの極座標展開図であり、第 12 図は本発明のスパイラル型リニアモータのモード 1 の磁気回路モデルの状態を示す極座標展開図であり、
15 第 13 図は本発明のスパイラル型リニアモータのモード 1 の磁気回路モデルの状態を示す等価磁気回路図であり、第 14 図は本発明のスパイラル型リニアモータのモード 2 の磁気回路モデルの状態を示す極座標展開図であり、第 15 図は本発明のスパイラル型リニアモータのモード 2 の磁気回路モデルの状態を示す等価磁気回路図であり、第 16 図は本発明のスパイラル型リニアモータの電機子回路図であり、第 17 図は本発明のスパイラル型リニアモータに適用する推力・トルク－電流変換器を示す図であり、第 18 図はスパイラル
20 面における回転方向に加えられた力 δf_θ と進行方向に作用する力 δf の関係を説明するための図であり、第 19 図は本発明のスパイ

ラル型リニアモータの推力制御系のブロック図であり、第 20 図は本発明のスパイラル型リニアモータの推力制御系の詳細ブロック図であり、第 21 図は本発明のスパイラル型リニアモータの位置制御系のブロック図であり、第 22 図は本発明のスパイラル型リニアモータの位置制御系の詳細ブロック図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、図面を用いて本発明を実施するための最良な形態におけるスパイラル型リニアモータを説明する。

以下、本発明の実施の形態について、図を参照しながら詳細に説明する。図 1 ～ 図 4 を用いて本発明のスパイラル型リニアモータの固定子について、図 5 ～ 図 7 を用いて本発明のスパイラル型リニアモータの回転子について、図 8 ～ 図 10 を用いて本発明のスパイラル型リニアモータの回転子と固定子の組み合わせの各構造について説明する。また、図 11 ～ 図 15 を用いて本発明のスパイラル型リニアモータの推力発生 の原理について説明し、図 16 を用いて本発明のスパイラル型リニアモータの電機子回路について説明し、図 17 ～ 図 22 を用いて本発明のスパイラル型リニアモータの制御について説明する。

本発明のスパイラル型リニアモータ 1 は固定子 2 と回転子 3 とを含み、回転子 3 は固定子 2 に対してらせん状の回転しながら軸方向に直動する。

図 1 は本発明の固定子 2 の概略構成を示す図である。固定子 2 は、軸方向に中空孔 2 b を有すると共に、軸方向に向かって所定のピッチで形成されたらせん状の磁極 2 a を備える。らせん状に形成される磁極 2 a は軸方向に側面 2 A と側面 2 B を有し、軸方向で隣り合

う磁極 2 a の側面 2 A と側面 2 B の間には、同ピッチのらせん状の溝 2 C が形成される。このらせん状の溝 2 C には、本発明の回転子 1 のらせん状部がらせん状の回転可能に設けられる。

また、磁極 2 a の側面 2 A, 側面 2 B には、軸方向の凹部を有する
5 スロット 2 c がらせん方向に沿って形成される。このスロット 2 c には磁界を形成するための巻き線が巻回される。

図 2 は、巻き線をスロット 2 c に巻回した固定子を示している。固定子 2 には 2 相の巻き線 4 が巻かれる。一方の相の巻き線 4 a は、例えば磁極 2 a の側面 2 A に形成されたスロット 2 c に軸方向に巻
10 かれ、他方の相の巻き線 4 b は、例えば磁極 2 a の側面 2 B に形成されたスロット 2 c に軸方向に巻かれ、側面 2 A に巻回される巻き線 4 a と側面 2 B に巻回される巻き線 4 b は、それぞれ 90 度位相をずらせて巻かれる。

図 3 は、固定子 2 に巻かれる 2 相の巻き線の位相状態を説明するための図である。図 3 (a) は、固定子を軸方向に投影した状態を示している。なお、ここでは、4 極の場合について示している。巻き線を巻回するスロット 2 c を円周方向で角度 α の間隔で形成し、各相の巻き線を 2 つのスロットに対して巻回する。これにより、各相の巻き線は角度 2α を単位として巻回される。

20 また、各相を a 相及び b 相としたとき、a 相と b 相は角度 α だけずれて巻回される。図 3 (b) は例えば a 相の巻き線により電流の流れを示し、図 3 (c) は例えば b 相の巻き線により電流の流れを示している。a 相の電流と b 相の電流は、互いに角度 α だけ位相がずれている。

25 図 4 は、固定子の作成手順の一例を説明するための概略図である。なお、図 4 (a) ~ (c) 中の 2 つの図は、同一状態の固定子を異

なる角度から見た状態を示している。

はじめに、円盤状の電磁鋼板を積層して円筒状の部材を形成する。電磁鋼板は珪素鋼板とすることができる。図4(a)は、この積層した電磁鋼板の外形を示している。次に、積層した電磁鋼板を、図4(b)に示すようにスパイラル形状に切削し、スパイラル状の磁極部分を形成する。さらに、スパイラル状の磁極部分を切削して、巻き線を巻くためのスロットを形成する。なお、高調波非同期トルクの異常トルクを防止するために、斜めに切削してスキューを設けるようにしてもよい。

図5は本発明の回転子3の概略構成を示す図である。回転子3は、中心軸3bと、該中心軸3bの軸方向に向かって所定のピッチでらせん状に形成されたらせん状部3aとを備える。らせん状部3aは軸方向に側面3Aと側面3Bを有し、軸方向で隣り合うらせん状部3aの側面3Aと側面3Bの間には、同ピッチのらせん状の溝3Cが形成される。また、らせん状部3aの側面3Aと側面3Bの面には永久磁石3cが取り付けられる。

図6は回転子を軸方向に投影した図である。図6は4極の例を示しており、90度間隔でN極及びS極の永久磁石3cが交互に取り付けられる。永久磁石3cは側面3A及び側面3Bに接着により取り付けることができる。

図7は、回転子の作成手順の一例を説明するための概略図である。なお、図7(a),(b)中の2つの図は、同一状態の回転子を異なる角度から見た状態を示している。はじめに、円柱状の部材を切削加工して中心軸3b及びらせん状部3aを形成する。図7(a)は、切削加工により形成した中心軸3b及びらせん状部3aの外形を示している。回転子3のらせん状部3aのピッチは、固定子2のらせ

ん状の溝 2 C のピッチと同ピッチに形成される。次に、図 7 (b) に示すように、形成したらせん状部 3 a の軸方向の両側面に 3 A, 3 B に永久磁石 3 c を接着する。

5 本発明のスパイラル型リニアモータ 1 は、固定子 2 に回転子 3 を組み込み、回転子 3 の中心軸 3 b の両端を軸支すると共に、固定子 2 をフレームで支持することにより構成することができる。なお、フレームはアルミ材等で形成することができる。

図 8 は固定子 2 に回転子 3 を組み込んだ状態を外側から見た図であり、図 9 は同じく固定子 2 に回転子 3 を組み込んだ状態の一部を
10 切り取って内部状態を示した図である。

回転子 3 のらせん状部 3 a は、固定子 2 のらせん状の溝 2 C 内にらせん状に回転自在となるように組み込まれ、また、回転子 3 のらせん状の溝 3 C には、固定子 2 のらせん状の磁極 2 a がらせん状に回転自在となるように組み込まれて取り付けられる。

15 また、固定子 2 の磁極 2 a の側面 2 A, 側面 2 B には、軸方向の凹部を形成してなるスロット 2 c がらせん方向に沿って形成される。このスロット 2 c には磁界を形成するための巻き線 4 が巻回される。巻き線 4 に電流を供給することにより磁極 2 a には磁界が形成され、この固定子 2 側に形成される磁界と、回転子 3 の永久磁石 3 c によ
20 る磁界との相互作用により軸方向の推力及び回転トルクが形成される。

本発明のスパイラル型リニアモータは、固定子 2 と回転子 3 の軸方向のギャップを一定値に制御しながら回転力を制御する。回転子 3 は、固定子 2 に対してらせん状に進行し、出力軸である回転子 3
25 の中心軸 3 b は直動機構として動作する。

図 10 は本発明のスパイラル型リニアモータの縦断面図である。

本発明のスパイラル型リニアモータ 1 は、その外周部分にモータフレーム 5 を備え、これにより固定子 2 を支持する。図 10 では、固定子 2 の磁極 2 a の外周面をモータフレーム 5 の内周面に固着することにより固定子 2 の支持を行っている。なお、この固着は、ねじ
5 で行う他に接着材を用いるようにしてもよい。

また、回転子 3 はモータフレーム 5 に対して、リニアベアリング 6 により回転自在に支持される。リニアベアリング 6 はモータフレーム 5 の両端に設けた支持部材により取り付けられ、回転子 3 の中心軸 3 b の両端部分を回転支持する。

10 なお、固定子 2 の側面部分には、回転子 3 の側面とのギャップを検出するためにギャップセンサ 7 が取り付けられる。また、回転子 3 の回転速度を検出するためにロータリエンコーダ 8 が取り付けられる。

次に、本発明のスパイラル型リニアモータの推力発生原理について説明する。
15

図 11 は本発明のスパイラル型リニアモータの極座標展開図である。極座標展開図において、回転子 3 から見ると、回転子 3 は 2 つの固定子 2 の磁極により挟まれる。この磁極に設けた隣接する巻き線に対して、位相が 90 度ずれた電流 I_a 及び I_b を供給することにより回転子 3 を挟む閉磁路が形成され、回転子 3 の設けられる永久磁石 3 はこの閉磁路による磁界の作用を受ける。
20

ここで、この極座標展開図において、固定子 2 側のスロットに巻回される巻き線の角度を 2α とし、回転子 3 側の永久磁石の角度を 2β とし、固定子 2 に対する回転子 3 の回転角度を θ とする。また、
25 固定子 2 と回転子 3 の側面間のギャップを l_g とし、永久磁石の厚さを l_m とし、回転子 3 の固定子 2 の溝内における偏りを x とし、固定

子及び回転子のピッチを l_p とし、永久磁石の中心軸から径方向の端部までの距離をそれぞれ r_1 , r_2 ($r_1 < r_2$) としている。

なお、ここで用いるパラメータは、以下の表 1 で示される。

表 1 パラメータ

I_a [A]	固定子裏面の A 相電機子電流
I_b [A]	固定子裏面の B 相電機子電流
I'_a [A]	固定子表面の A 相電機子電流
I'_b [A]	固定子表面の B 相電機子電流
n	電機子巻線の巻数
α [rad]	隣り合う固定子スロット間の角度 $= \pi/2p$
β [rad]	回転子永久磁石の角度 $\div 2$
ℓ_m [m]	回転子永久磁石の厚さ
ℓ_g [m]	固定子と回転子のギャップ幅の基準値
x_g [m]	固定子と回転子のギャップの変位
θ [m]	回転子の回転角度
r_1 [m]	永久磁石の内径
r_2 [m]	永久磁石の外径
p	らせん 1 層あたりの極対数
q	らせんの層数
μ_0	真空の透磁率
μ_m	永久磁石の透磁率
B_r [T]	永久磁石の残留磁束密度
ℓ_p [m]	らせんのピッチ

5 この極座標展開図において、界磁巻き線と永久磁石の相対位置関係に応じて 2 通りの磁気回路のモデル（とモード 2 とする）が考えられる。

第 1 の磁気回路のモデル（モード 1）は、永久磁石が巻き線の一つ跨ぐ場合である。図 1 2 の極座標展開図及び図 1 3 の等価磁気回路はこのモード 1 の磁気回路モデルの状態を示している。

10 このモード 1 では、回転角を θ としたとき、 $-(\alpha - \beta) \leq \theta \leq (\alpha - \beta)$ が成立する場合であり、このときのパラメータは、以下の表 2 で示される。

表 2 モード 1 の磁気回路パラメータ

F_m	永久磁石の起磁力
R_{m1}	領域 (i) の永久磁石の磁気抵抗
R_{m2}	領域 (ii) の永久磁石の磁気抵抗
Φ_1	領域 (i)-(A) の磁束
Φ_{m1}	領域 (i)-(A) の永久磁石のある領域の磁束
$\Phi_{\ell 1}$	領域 (i)-(A) の永久磁石のない領域の磁束
Φ_2	領域 (ii)-(A) の磁束
Φ_{m2}	領域 (ii)-(A) の永久磁石のある領域の磁束
$\Phi_{\ell 2}$	領域 (ii)-(A) の永久磁石のない領域の磁束
F_1	領域 (i)-(A) の電機子巻線の起磁力
F_2	領域 (ii)-(A) の電機子巻線の起磁力
R_{g1}	領域 (i)-(A) のギャップ磁気抵抗
$R_{\ell 1}$	領域 (i)-(A) のもれ磁路の磁気抵抗
R_{g2}	領域 (ii)-(A) のギャップ磁気抵抗
$R_{\ell 2}$	領域 (ii)-(A) のもれ磁路の磁気抵抗
Φ'_1	領域 (i)-(B) の磁束
Φ'_{m1}	領域 (i)-(B) の永久磁石のある領域の磁束
$\Phi'_{\ell 1}$	領域 (i)-(B) の永久磁石のない領域の磁束
Φ'_2	領域 (ii)-(B) の磁束
Φ'_{m2}	領域 (ii)-(B) の永久磁石のある領域の磁束
$\Phi'_{\ell 2}$	領域 (ii)-(B) の永久磁石のない領域の磁束
F'_1	領域 (i)-(B) の電機子巻線の起磁力
F'_2	領域 (ii)-(B) の電機子巻線の起磁力
R'_{g1}	領域 (i)-(B) のギャップ磁気抵抗
$R'_{\ell 1}$	領域 (i)-(B) のもれ磁路の磁気抵抗
R'_{g2}	領域 (ii)-(B) のギャップ磁気抵抗
$R'_{\ell 2}$	領域 (ii)-(B) のもれ磁路の磁気抵抗

ここで、対称性から領域 (iii) - (A), (iv) - (A), (iii) - (B), (iv) - (B) の磁束はそれぞれ $-\Phi_1$, $-\Phi_2$, $-\Phi'_1$, $-\Phi'_2$ となる。また、電機子巻き線の起磁力も同様に、 $-F_1$, $-F_2$, $-F'_1$, $-F'_2$ となる。

また、第 2 の磁気回路のモデル (モード 2) は、永久磁石が巻き線を二つ跨ぐ場合である。図 14 の極座標展開図及び図 15 の等価磁気回路はこのモード 2 の磁気回路モデルの状態を示している。

このモード 2 では、回転角を θ としたとき、 $(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \beta$ が成立する場合であり、このときのパラメータは、以下の表 3 で示される。

表 3 モード 2 の磁気回路パラメータ

F_m	永久磁石の起磁力
R_{m1}	領域 (i) の永久磁石の磁気抵抗
R_{m2}	領域 (ii) の永久磁石の磁気抵抗
Φ_1	領域 (i)-(A) の磁束
Φ_{m1}, Φ_{m2}	領域 (i)-(A) の永久磁石のある領域の磁束
$\Phi_{\ell 1}$	領域 (i)-(A) の永久磁石のない領域の磁束
Φ_2	領域 (ii)-(A) の磁束
F_1	領域 (i)-(A) の電機子巻線の起磁力
F_2	領域 (ii)-(A) の電機子巻線の起磁力
R_{g11}, R_{g12}	領域 (i)-(A) のギャップ磁気抵抗
$R_{\ell 1}$	領域 (i)-(A) のもれ磁路の磁気抵抗
R_{g2}	領域 (ii)-(A) のギャップ磁気抵抗
Φ'_1	領域 (i)-(B) の磁束
Φ'_{m1}, Φ'_{m2}	領域 (i)-(B) の永久磁石のある領域の磁束
$\Phi'_{\ell 1}$	領域 (i)-(B) の永久磁石のない領域の磁束
Φ'_2	領域 (ii)-(B) の磁束
F'_1	領域 (i)-(B) の電機子巻線の起磁力
F'_2	領域 (ii)-(B) の電機子巻線の起磁力
R'_{g11}, R'_{g12}	領域 (i)-(B) のギャップ磁気抵抗
$R'_{\ell 1}$	領域 (i)-(B) のもれ磁路の磁気抵抗
R'_{g2}	領域 (ii)-(B) のギャップ磁気抵抗

- 5 ここで、モード 1 における推力を求める。回転角 θ が $-(\alpha - \beta) \leq \theta \leq (\alpha - \beta)$ の範囲にある場合の推力について、図 12 のように、電機子巻き線の各相に電流 I_a [A], I_b [A], I'_a [A], I'_b [A] を流したとき、領域 (i), (ii) での電機子巻き線による起磁力 F_1, F_2, F'_1, F'_2 [A] 及び永久磁石による起磁力 F_m [A] は以下の式 (1) ~ (5) で表される。
- 10

$$F_1 = -n(I_a - I_b) \dots\dots\dots (1)$$

$$F_2 = -n(I_a + I_b) \dots\dots\dots (2)$$

$$F'_1 = -n(I'_a - I'_b) \dots\dots\dots (3)$$

$$F'_2 = -n(I'_a + I'_b) \dots\dots\dots (4)$$

$$F_m = \frac{B_r \ell_m}{\mu_m} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 n は巻数を表す。また、 B'_r [T] は永久磁石の残留磁束密度を、 μ'_m は永久磁石の透磁率を表す。また、各磁気抵抗は以下の式 (6) ~ (15) で表される。

$$R_{g1} = \frac{-x_g + \ell_g}{(\beta - \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (6)$$

$$R_{m1} = \frac{\ell_m}{(\beta - \theta)S_0\mu_m} \dots\dots\dots (7)$$

$$R_{t1} = \frac{-x_g + \ell_g + \ell_m}{(\alpha - \beta + \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (8)$$

$$R_{g2} = \frac{-x_g + \ell_g}{(\beta + \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (9)$$

$$R_{m2} = \frac{\ell_m}{(\beta + \theta)S_0\mu_m} \dots\dots\dots (10)$$

$$R_{t2} = \frac{-x_g + \ell_g + \ell_m}{(\alpha - \beta - \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (11)$$

$$R'_{g1} = \frac{x_g + \ell_g}{(\beta - \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (12)$$

$$R'_{t1} = \frac{x_g + \ell_g + \ell_m}{(\alpha - \beta + \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (13)$$

$$R'_{g2} = \frac{x_g + \ell_g}{(\beta + \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (14)$$

$$R'_{t2} = \frac{x_g + \ell_g + \ell_m}{(\alpha - \beta - \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 $S_0 = r_2^2 - r_1^2$, μ_0 は真空の透磁率である。

5

以下、領域 (A) について見ると、領域 (A) における磁気回路の方程式は図 13 より以下の式 (16) ~ (21) で表される。

$$-F_1 - F_m + R_{g1}\Phi_{m1} + R_{m1}\Phi_{m1} = 0 \dots\dots (16)$$

$$-F_1 + R_{\ell1}\Phi_{\ell1} = 0 \dots\dots (17)$$

$$\Phi_{\ell1} + \Phi_{m1} = \Phi_1 \dots\dots (18)$$

$$-F_2 - F_m + R_{g2}\Phi_{m2} + R_{m2}\Phi_{m2} = 0 \dots\dots (19)$$

$$-F_2 + R_{\ell2}\Phi_{\ell2} = 0 \dots\dots (20)$$

$$\Phi_{\ell2} + \Phi_{m2} = \Phi_2 \dots\dots (21)$$

これより、磁気回路を貫き磁束を求めると、以下の式(22)～(27)で表される。

$$\begin{aligned} \Phi_{m1} &= \frac{F_1 + F_m}{R_{g1} + R_{m1}} \\ &= \frac{(\beta - \theta)S_0\mu_0(B_r\ell_m + n(-I_a + I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\ell1} &= \frac{F_1}{R_{\ell1}} \\ &= -\frac{n(\alpha - \beta + \theta)(I_a - I_b)S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{F_m R_{\ell1} + F_1(R_{g1} + R_{\ell1} + R_{m1})}{R_{\ell1}(R_{g1} + R_{m1})} \\ &= S_0\mu_0 \left(\frac{(\beta - \theta)(B_r\ell_m + n(-I_a + I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} - \frac{n(\alpha - \beta + \theta)(I_a - I_b)}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \right) \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{m2} &= \frac{F_2 + F_m}{R_{g2} + R_{m2}} \\ &= \frac{(\beta + \theta)S_0\mu_0(B_r\ell_m - n(I_a + I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\ell2} &= \frac{F_2}{R_{\ell2}} \\ &= -\left(\frac{n(\alpha - \beta - \theta)(I_a + I_b)S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \right) \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \frac{F_m R_{\ell2} + F_2(R_{g2} + R_{\ell2} + R_{m2})}{R_{\ell2}(R_{g2} + R_{m2})} \\ &= S_0\mu_0 \left(\frac{(\beta + \theta)(B_r\ell_m - n(I_a + I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} - \frac{n(\alpha - \beta - \theta)(I_a + I_b)}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \right) \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

これより、電機子巻き線電流 I_a , I_b 及び等価磁化電流 $I_m = F_m$ に鎖交する磁束 Φ_a , Φ_b , Φ_m は、極対数及び層数を考慮して、以下の式 (28) ~ (30) で表される。

$$\begin{aligned}\Phi_a &= -2pqn(\Phi_1 + \Phi_2) \\ &= -4pqnS_0\mu_0 \left(\frac{(\beta B_r \ell_m - n(\beta I_a + \theta I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \right. \\ &\quad \left. - \frac{n((\alpha - \beta)I_a - \theta I_b)}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \right) \dots\dots\dots (28)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_b &= 2pqn(\Phi_1 - \Phi_2) \\ &= 4pqnS_0\mu_0 \left(\frac{(-\theta B_r \ell_m + n(\theta I_a + \beta I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \right. \\ &\quad \left. - \frac{n(\theta I_a - (\alpha - \beta)I_b)}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \right) \dots\dots\dots (29)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_m &= 2pq(\Phi_{m1} + \Phi_{m2}) \\ &= \frac{4pqS_0\mu_0(\beta B_r \ell_m - n(\beta I_a + \theta I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \quad (30)\end{aligned}$$

5 簡単のために、永久磁石の透磁率 μ_m が真空の透磁率 μ_0 に等しいとすると、領域 (A) における全磁気エネルギーは以下の式 (31), (32) で表される。

$$W_0 = \frac{I_a\Phi_a + I_b\Phi_b + I_m\Phi_m}{2} \dots\dots\dots (31)$$

$$\begin{aligned}&= \frac{2pqS_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \left(\beta \left(\frac{B_r \ell_m}{\mu_0} \right)^2 - 2n \frac{B_r \ell_m}{\mu_0} \right. \\ &\quad \left. \times (\beta I_a + \theta I_b) + n^2 \alpha (I_a^2 + I_b^2) \right) \dots (32)\end{aligned}$$

10 同様にして、領域 (B) における全磁気エネルギーは以下の式 (33), (34) で表される。

$$W'_0 = \frac{I'_a \Phi'_a + I'_b \Phi'_b + I'_m \Phi'_m}{2} \dots\dots\dots (33)$$

$$= \frac{2pqS_0\mu_0}{x_g + \ell_g + \ell_m} \left(\beta \left(\frac{B_r \ell_m}{\mu_0} \right)^2 - 2n \frac{B_r \ell_m}{\mu_0} \right. \\ \left. \times (\beta I'_a + \theta I'_b) + n^2 \alpha (I'^2_a + I'^2_b) \right) \dots (34)$$

これより、領域（A）と領域（B）を合わせた全磁気エネルギーは、以下の式（35）で表される。

$$W = W_0 + W'_0 \\ = \frac{2pqS_0\mu_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)(x_g + \ell_g + \ell_m)} \\ \times \left(2\beta \left(\frac{B_r \ell_m}{\mu_0} \right)^2 (\ell_g + \ell_m) \right. \\ \left. - 2n \frac{B_r \ell_m}{\mu_0} \left((\beta I'_a + \theta I'_b)(-x_g + \ell_g + \ell_m) \right. \right. \\ \left. \left. + (\beta I_a + \theta I_b)(x_g + \ell_g + \ell_m) \right) \right. \\ \left. + n^2 \alpha \left((I'^2_a + I'^2_b)(-x_g + \ell_g + \ell_m) \right. \right. \\ \left. \left. + (I_a^2 + I_b^2)(x_g + \ell_g + \ell_m) \right) \right) \dots (35)$$

5

磁気エネルギーWを変位 x_g と回転角 θ で偏微分すると推力 f とトルク τ を求めることができ、以下の式（36）、（37）でそれぞれ表される。

17

$$\begin{aligned}
 f = \frac{\partial W}{\partial x_g} = & \frac{2pqS_0\mu_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2(x_g + \ell_g + \ell_m)^2} \\
 & \times \left(4x_g\beta \left(\frac{B_r\ell_m}{\mu_0} \right)^2 (\ell_g + \ell_m) \right. \\
 & + 2n \frac{B_r\ell_m}{\mu_0} \left((\beta I'_a + \theta I'_b)(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2 \right. \\
 & \quad \left. - (\beta I_a + \theta I_b)(x_g + \ell_g + \ell_m)^2 \right) \\
 & - n^2\alpha \left((I'_a{}^2 + I'_b{}^2)(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2 \right. \\
 & \quad \left. - (I_a{}^2 + I_b{}^2)(x_g + \ell_g + \ell_m)^2 \right) \Bigg) \dots\dots\dots (36)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau = \frac{\partial W}{\partial \theta} \\
 = -4pqnB_r\ell_mS_0 \left(\frac{I_b}{-x_g + \ell_g + \ell_m} + \frac{I'_b}{x_g + \ell_g + \ell_m} \right) \\
 \dots\dots\dots (37)
 \end{aligned}$$

次に、モード 2 における推力を求める。回転角 θ が $(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \beta$ の範囲にある場合の推力は、図 1 4 より各磁気抵抗は以下の式 (3 8) ~ (4 4) で表される。

$$R_{g11} = \frac{-x_g + \ell_g}{(-\alpha + \beta + \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (38)$$

$$R_{g12} = \frac{-x_g + \ell_g}{(\beta - \theta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (39)$$

$$R_{m11} = \frac{\ell_m}{(-\alpha + \beta + \theta)S_0\mu_m} \dots\dots\dots (40)$$

$$R_{m12} = \frac{\ell_m}{(\beta - \theta)S_0\mu_m} \dots\dots\dots (41)$$

$$R_{t1} = \frac{-x_g + \ell_g + \ell_m}{2(\alpha - \beta)S_0\mu_0} \dots\dots\dots (42)$$

$$R_{g2} = \frac{-x_g + \ell_g}{\alpha S_0\mu_0} \dots\dots\dots (43)$$

$$R_{m2} = \frac{\ell_m}{\alpha S_0\mu_m} \dots\dots\dots (44)$$

一方、磁気回路の方程式は図 1 5 より以下の式 (4 5) ~ (4 9)

で表される。

$$-F_1 + F_m + R_{g11}\Phi_{m1} + R_{m11}\Phi_{m1} = 0 \dots (45)$$

$$-F_1 - F_m + R_{g12}\Phi_{m2} + R_{m12}\Phi_{m2} = 0 \dots (46)$$

$$-F_1 + R_{\ell 1}\Phi_{\ell 1} = 0 \dots (47)$$

$$\Phi_{\ell 1} + \Phi_{m1} + \Phi_{m2} = \Phi_1 \dots (48)$$

$$-F_2 - F_m + R_{g2}\Phi_2 + R_{m2}\Phi_2 = 0 \dots (49)$$

これより、磁束を求めると、以下の式 (50) ~ (54) で表される。

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{F_1}{R_{\ell 1}} + \frac{F_1 - F_m}{R_{g11} + R_{m11}} + \frac{F_1 + F_m}{R_{g12} + R_{m12}} \\ &= \frac{-2n(\alpha - \beta)(I_a - I_b)S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \\ &\quad + \frac{S_0\mu_0}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} ((\alpha - 2\theta)B_r\ell_m \\ &\quad + n(\alpha - 2\beta)(I_a - I_b)\mu_m) \dots\dots\dots (50) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{m1} &= \frac{F_1 - F_m}{R_{g11} + R_{m11}} \\ &= \frac{(\alpha - \beta - \theta)S_0\mu_0(B_r\ell_m + n(I_a - I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \\ &\dots\dots\dots (51) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{m2} &= \frac{F_1 + F_m}{R_{g12} + R_{m12}} \\ &= \frac{(\beta - \theta)S_0\mu_0(B_r\ell_m + n(-I_a + I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \\ &\dots\dots\dots (52) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\ell 1} &= \frac{F_1}{R_{\ell 1}} \\ &= \frac{-2n(\alpha - \beta)(I_a - I_b)S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dots\dots\dots (53) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \frac{F_2 + F_m}{R_{g2} + R_{m2}} \\ &= \frac{\alpha S_0\mu_0(B_r\ell_m - n(I_a + I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \dots\dots (54) \end{aligned}$$

これより、電機子巻き線電流 I_a , I_b 及び等価磁化電流 $I_m = F_m$ に鎖交する磁束 Φ_a , Φ_b , Φ_m を極対数及び層数を考慮して、以下の式 (55) ~ (57) で表される。

$$\begin{aligned}\Phi_a &= -2pqn(\Phi_1 + \Phi_2) \\ &= 4pqn \left(\frac{n(\alpha - \beta)(I_a - I_b)S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \right. \\ &\quad \left. - \frac{S_0\mu_0((\alpha - \theta)B_r\ell_m - n(\beta I_a + (\alpha - \beta)I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \right) \\ &\quad \dots\dots\dots (55)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_b &= 2pqn(\Phi_1 - \Phi_2) \\ &= 4pqn \left(\frac{-n(\alpha - \beta)(I_a - I_b)S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \right. \\ &\quad \left. - \frac{S_0\mu_0(\theta B_r\ell_m - n((\alpha - \beta)I_a + \beta I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \right) \\ &\quad \dots\dots\dots (56)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_m &= 2pq(-\Phi_{m1} + \Phi_{m2} + \Phi_2) \\ &= \frac{4pqS_0\mu_0(\beta B_r\ell_m - n(\alpha - \theta)(I_a - I_b)\mu_m)}{\ell_m\mu_0 + (-x_g + \ell_g)\mu_m} \dots (57)\end{aligned}$$

- 5 簡単のために、永久磁石の透磁率 μ_m が真空の透磁率 μ_0 に等しいとすると、領域 (A) における全磁気エネルギーは以下の式 (58), (59) で表される。

$$W_0 = \frac{I_a\Phi_a + I_b\Phi_b + I_m\Phi_m}{2} \dots\dots\dots (58)$$

$$\begin{aligned}&= \frac{2pqS_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \left(\beta \left(\frac{B_r\ell_m}{\mu_0} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. - 2n \frac{B_r\ell_m}{\mu_0} ((\alpha - \theta)I_a + \theta I_b) \right. \\ &\quad \left. + n^2\alpha(I_a^2 + I_b^2) \right) \dots\dots\dots (59)\end{aligned}$$

同様にして、領域（Ｂ）における全磁気エネルギーは以下の式（６０），（６１）で表される。

$$W'_0 = \frac{I_a \Phi_a + I_b \Phi_b + I_m \Phi_m}{2} \dots\dots\dots (60)$$

$$= \frac{2pqS_0\mu_0}{x_g + \ell_g + \ell_m} \left(\beta \left(\frac{B_r \ell_m}{\mu_0} \right)^2 - 2n \frac{B_r \ell_m}{\mu_0} ((\alpha - \theta)I_a + \theta I_b) + n^2 \alpha (I_a^2 + I_b^2) \right) \dots\dots\dots (61)$$

これより、領域（Ａ）と領域（Ｂ）を合わせた全磁気エネルギーは、以下の式（６２）で表される。

$$\begin{aligned} W &= W_0 + W'_0 \\ &= \frac{2pqS_0\mu_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)(x_g + \ell_g + \ell_m)} \\ &\quad \times \left(2\beta \left(\frac{B_r^2 \ell_m}{\mu_0} \right)^2 (\ell_g + \ell_m) - 2n \frac{B_r \ell_m}{\mu_0} ((\alpha - \theta)I'_a + \theta I'_b)(-x_g + \ell_g + \ell_m) \right. \\ &\quad \left. + ((\alpha - \theta)I_a + \theta I_b)(x_g + \ell_g + \ell_m) \right. \\ &\quad \left. + n^2 \alpha ((I'_a)^2 + (I'_b)^2)(-x_g + \ell_g + \ell_m) \right. \\ &\quad \left. + (I_a^2 + I_b^2)(x_g + \ell_g + \ell_m) \right) \dots\dots\dots (62) \end{aligned}$$

モード１と同様に、磁気エネルギーWを変位 x_g と回転角 θ で偏微分すると推力fとトルク τ を求めることができ、以下の式（６３），（６４）でそれぞれ表される。

21

$$\begin{aligned}
 f = \frac{\partial W}{\partial x_g} = & \frac{2pqS_0\mu_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2(x_g + \ell_g + \ell_m)^2} \\
 & \times \left(4x_g\beta \left(\frac{B_r\ell_m}{\mu_0} \right)^2 (\ell_g + \ell_m) \right. \\
 & + 2n \frac{B_r\ell_m}{\mu_0} \left(((\alpha - \theta)I'_a + \theta I'_b)(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2 \right. \\
 & \quad - ((\alpha - \theta)I_a + \theta I_b)(x_g + \ell_g + \ell_m)^2 \Big) \\
 & \quad - n^2\alpha \left((I_a'^2 + I_b'^2)(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2 \right. \\
 & \quad \left. \left. - (I_a^2 + I_b^2)(x_g + \ell_g + \ell_m)^2 \right) \right) \dots\dots\dots (63)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau = \frac{\partial W}{\partial \theta} \\
 = 4pqnB_r\ell_mS_0 \left(\frac{I_a - I_b}{-x_g + \ell_g + \ell_m} + \frac{I'_a - I'_b}{x_g + \ell_g + \ell_m} \right) \\
 \dots\dots\dots (64)
 \end{aligned}$$

ここで、本発明のスパイラル型リニアモータの一数值例について示す。

5 外径 60 [mm]，中心軸径 10 [mm]，ギャップ長 1 [mm]，
永久磁石の厚さ 2 [mm] とした場合の数值例は以下の式 (65)
～ (74) で表される。

$$\ell_g = 0.001[\text{mm}] \dots\dots\dots (65)$$

$$\ell_m = 0.002[\text{mm}] \dots\dots\dots (66)$$

$$\alpha = \pi/4[\text{rad}] \dots\dots\dots (67)$$

$$\beta = \pi/6[\text{rad}] \dots\dots\dots (68)$$

$$S_0 = 0.03^2 - 0.005^2[\text{m}^2] \dots\dots\dots (69)$$

$$\mu_0 = \mu_m = 4\pi \times 10^{-7} \dots\dots\dots (70)$$

$$B_r = 1[\text{T}] \dots\dots\dots (71)$$

$$n = 20[\text{回}] \dots\dots\dots (72)$$

$$p = 2(\text{極対数}) \dots\dots\dots (73)$$

$$q = 5(\text{層数}) \dots\dots\dots (74)$$

ここで、変位 $x_g = 0$ [mm] のときの推力 f とトルク τ は、以下の式 (75), (76) でそれぞれ表される。

$$f = \begin{cases} -81.4(I_a - I'_a) - 156\theta(I_b - I'_b) \\ \quad + 0.768(I_a^2 + I_b^2 - I'^2_a - I'^2_b) \\ \quad \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ - (122 - 156\theta)(I_a - I'_a) \\ \quad + (61.1 - 156\theta)(I_b - I'_b) \\ \quad + 0.768(I_a^2 - I_a I_b - I'^2_a + I'_a I'_b) \\ \quad \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \quad (75)$$

$$\tau = \begin{cases} -0.467(I_b + I'_b) \\ \quad \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ 0.467(I_a - I_b + I'_a - I'_b) \\ \quad \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \quad (76)$$

また、変位 $x_g = 0.001$ [mm] のときの推力 f とトルク τ は、
5 以下の式 (77), (78) でそれぞれ表される。

$$f = \begin{cases} 5470 - 183I_a - 350\theta I_b + 45.8I'_a + 87.5\theta I'_b \\ \quad + 1.73(I_a^2 + I_b^2) - 0.432(I'^2_a + I'^2_b) \\ \quad \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ 5470 - (275 - 350\theta)I_a + (137 - 350\theta)I_b \\ \quad + (68.7 - 87.5\theta)I'_a - (34.3612 - 87.5\theta)I'_b \\ \quad + 1.73(I_a^2 - I_a I_b) - 0.432(I'^2_a - I'_a I'_b) \\ \quad \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \dots\dots\dots (77)$$

$$\tau = \begin{cases} -0.7I_b - 0.35I'_b \\ \quad \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ 0.7(I_a - I_b) + 0.35(I'_a - I'_b) \\ \quad \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \quad (78)$$

なお、上記式で現れる定数項は、永久磁石が鉄心を引き付ける力であり、回転子が固定子のギャップのちょうど中間にあるとき、すなわち変位 $x_g = 0$ [mm] のときは、回転子の両側の磁石の力が互いに打ち消し合い零になる。しかし、回転子が固定子の一方にタッ
10

チダウンした場合、すなわち変位 $x_g = 1$ [mm] のときは、タッチダウンした側の永久磁石の吸引力が勝り、5740 [N] もの吸引力が発生する。この吸引力に打ち勝って回転子を浮上させるためには28.5 [A] 以上の電流を流さなければならない。

- 5 ギャップがある値よりも小さくならないようなストッパーを導入することにより、タッチダウンによる永久磁石の破損を防ぐことができる。また、浮上に必要な電流を小さくすることができる。例えば、0.5 [mm] 以上変位しないようなストッパーを用いた場合、その最大変位 $x_g = 0.0005$ [m] における推力 f とトルク τ は、
- 10 以下の式 (79), (80) でそれぞれ表される。

$$f = \begin{cases} 2290 - 117I_a - 224\theta I_b + 59.8I'_a + 114\theta I'_b \\ \quad + 1.11(I_a^2 + I_b^2) - 0.564(I_a'^2 + I_b'^2) \\ \quad \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ 2290 - (176 - 224\theta)I_a + (88.0 - 224\theta)I_b \\ \quad + (89.8I_c - 114\theta)I'_a - (44.9I_d - 114\theta)I'_b \\ \quad + 1.11(I_a^2 - I_a I_b) - 0.564(I_a'^2 - I_a' I_b') \\ \quad \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases}$$

..... (79)

$$\tau = \begin{cases} -0.56I_b - 0.4I'_b \\ \quad \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ 0.56(I_a - I_b) + 0.4(I'_a - I'_b) \\ \quad \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \quad (80)$$

この場合、電流を15.2 [A] 以上流すことにより浮上が可能となる。

- 15 回転子が固定子のちょうど中間になるように $x_g = 0$ にギャップを制御した場合、最も推力の出にくい回転角 $\theta = \alpha / 2$ においても、推力定数は122 [N/A] となり、仮に電流を10 [A] 流せば、1200 [N] 以上の力を発生することができる。

次に、本発明のスパイラル型リニアモータの回路方程式について説明する。電機子抵抗を R 、各相の印加電圧をそれぞれ V_a 、 V_b 、 V'_a 、 V'_b とすると、印加電圧と誘起起電力の和が抵抗に加わるため、以下の式 (81) ~ (84) で表される回路方程式が成立する。

$$V_a - \dot{\Phi}_a = RI_a \dots\dots\dots (81)$$

$$V_b - \dot{\Phi}_b = RI_b \dots\dots\dots (82)$$

$$V'_a - \dot{\Phi}'_a = RI'_a \dots\dots\dots (83)$$

$$V'_b - \dot{\Phi}'_b = RI'_b \dots\dots\dots (84)$$

ただし、 $\dot{\Phi}_a = d\Phi_a/dt$ を表す。

簡単のため、 $\mu_m = \mu_0$ とし、上式左辺第 2 項の誘起起電力を求め

る。
モード 1 の場合には、式 (28)、(29) の両辺を時間微分することにより、以下の式 (85)、(86) で表される誘起起電力が求まる。

$$\dot{\Phi}_a = \frac{4pqn^2\alpha S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dot{I}_a - \frac{4pqnS_0(\beta B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2} \dot{x}_g \dots\dots\dots (85)$$

$$\dot{\Phi}_b = \frac{4pqn^2\alpha S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dot{I}_b - \frac{4pqnS_0(\theta B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2} \dot{x}_g - \frac{4pqn^2B_r\ell_mS_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dot{\theta} \dots\dots\dots (86)$$

また、モード 2 の場合には、式 (55)、(56) の両辺を時間微分することにより、以下の式 (87)、(88) で表される誘起起電力が求まる。

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_a = & \frac{4pqn^2\alpha S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dot{I}_a \\ & - \frac{4pqnS_0((\alpha - \theta)B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2} \dot{x}_g \\ & + \frac{4pqn^2B_r\ell_m S_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dot{\theta} \dots\dots\dots (87)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_b = & \frac{4pqn^2\alpha S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dot{I}_b - \frac{4pqnS_0(\theta B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2} \dot{x}_g \\ & - \frac{4pqn^2B_r\ell_m S_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dot{\theta} \dots\dots\dots (88)\end{aligned}$$

上式をまとめると、誘起起電力は以下の式（８９），（９０）で表される。なお、図１６は、式（８９）で表される電機子回路を示している。

$$V_a = RI_a + L\dot{I}_a + K_{Eax}\dot{x}_g + K_{Ea\theta}\dot{\theta} \dots\dots\dots (89)$$

$$5 \quad V_b = RI_b + L\dot{I}_b + K_{Ebx}\dot{x}_g + K_{Eb\theta}\dot{\theta} \dots\dots\dots (90)$$

ただし、 L は電機子インダクタンス、 K_{Eax} 、 $K_{Ea\theta}$ はＡ相の誘起電圧定数、 K_{Ebx} 、 $K_{Eb\theta}$ はＢ相の誘起電圧定数であり、以下の式（９１）～（９５）で表される。

$$L = \frac{4pqn^2\alpha S_0\mu_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dots\dots\dots (91)$$

$$K_{Eax} = \begin{cases} -\frac{4pqnS_0(\beta B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2} & \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ -\frac{4pqnS_0((\alpha - \theta)B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2} & \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \dots\dots\dots (92)$$

$$K_{Ea\theta} = \begin{cases} 0 & \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ \frac{4pqn^2B_r\ell_m S_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} & \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \dots\dots\dots (93)$$

$$K_{Ebx} = -\frac{4pqnS_0(\theta B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2} \dots\dots\dots (94)$$

$$K_{Eb\theta} = -\frac{4pqn^2B_r\ell_m S_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m} \dots\dots\dots (95)$$

また、領域 (B) の巻き線についても同様にして、誘起起電力は以下の式 (96), (97) で表される。

$$V'_a = RI'_a + L'\dot{I}'_a + K'_{Eax}\dot{x}_g + K'_{Ea\theta}\dot{\theta} \dots\dots (96)$$

$$V'_b = RI'_b + L'\dot{I}'_b + K'_{Ebx}\dot{x}_g + K'_{Eb\theta}\dot{\theta} \dots\dots (97)$$

ただし、 L' , K'_{Eax} , $K'_{Ea\theta}$, K'_{Ebx} , $K'_{Eb\theta}$ は以下の式 (9

5 8) ~ (102) で表される。

$$L' = \frac{4pqn^2\alpha S_0\mu_0}{x_g + \ell_g + \ell_m} \dots\dots\dots (98)$$

$$K'_{Eax} = \begin{cases} -\frac{4pqnS_0(\beta B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(x_g + \ell_g + \ell_m)^2} & \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ -\frac{4pqnS_0((\alpha - \theta)B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(x_g + \ell_g + \ell_m)^2} & \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \dots\dots\dots (99)$$

$$K'_{Ea\theta} = \begin{cases} 0 & \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ \frac{4pqn^2B_r\ell_mS_0}{x_g + \ell_g + \ell_m} & \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \dots\dots\dots (100)$$

$$K'_{Ebx} = -\frac{4pqnS_0(\theta B_r\ell_m - n\alpha I_a\mu_0)}{(x_g + \ell_g + \ell_m)^2} \dots\dots (101)$$

$$K'_{Eb\theta} = -\frac{4pqn^2B_r\ell_mS_0}{x_g + \ell_g + \ell_m} \dots\dots\dots (102)$$

次に、本発明のスパイラル型リニアモータの制御について説明する。本発明のスパイラル型リニアモータは、推力 f とトルク τ を独立して制御することができる。

10 推力の理論式 (36), (63) において、ギャップ変位 x_g が十分基準ギャップ l_g に比べて十分小さいと仮定し、2次以上の項を無視して $x_g = 0$ のまわりで線形化すると、以下の式 (103) ~ (106) で表される近似式が得られる。

$-(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta$ のとき

$$f \simeq \frac{8pqx_g\beta B_r^2\ell_m^2(\ell_g + \ell_m)S_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2(x_g + \ell_g + \ell_m)^2\mu_0} - \frac{4pqn\beta B_r\ell_m S_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2}I_a - \frac{4pqn\theta B_r\ell_m S_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2}I_b + \frac{4pqn\beta B_r\ell_m S_0}{(x_g + \ell_g + \ell_m)^2}I'_a + \frac{4pqn\theta B_r\ell_m S_0}{(x_g + \ell_g + \ell_m)^2}I'_b \quad (103)$$

$$\tau = -\frac{4pqnB_r\ell_m S_0}{-x_g + \ell_g + \ell_m}I_b - \frac{4nB_r\ell_m S_0}{x_g + \ell_g + \ell_m}I'_b \quad \dots \quad (104)$$

$\alpha - \beta \leq \theta \leq \beta$ のとき

$$f \simeq \frac{8pqx_g\beta B_r^2\ell_m^2(\ell_g + \ell_m)S_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2(x_g + \ell_g + \ell_m)^2\mu_0} - \frac{4pqn(\alpha - \theta)B_r\ell_m S_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2}I_a - \frac{4pqn\theta B_r\ell_m S_0}{(-x_g + \ell_g + \ell_m)^2}I_b + \frac{4pqn(\alpha - \theta)B_r\ell_m S_0}{(x_g + \ell_g + \ell_m)^2}I'_a + \frac{4pqn\theta B_r\ell_m S_0}{(x_g + \ell_g + \ell_m)^2}I'_b \quad \dots \quad (105)$$

$$\tau = 4pqnB_r\ell_m S_0 \left(\frac{I_a - I_b}{-x_g + \ell_g + \ell_m} + \frac{I'_a - I'_b}{x_g + \ell_g + \ell_m} \right) \quad \dots \quad (106)$$

上式を一般化すると、推力定数、トルク定数を用いて以下の式（１０７），（１０８）で表される。

$$f = f_0(x_g) + K_{fa}(x_g, \theta)I_a + K_{fb}(x_g, \theta)I_b + K'_{fa}(x_g, \theta)I'_a + K'_{fb}(x_g, \theta)I'_b \quad \dots \quad (107)$$

$$\tau = K_{ta}(x_g, \theta)I_a + K_{tb}(x_g, \theta)I_b + K'_{ta}(x_g, \theta)I'_a + K'_{tb}(x_g, \theta)I'_b \quad \dots \quad (108)$$

5 さらに、まとめると、以下の式（１０９）～（１１３）で表される。

$$F = F_0(x_g) + K(x_g, \theta)I \dots\dots\dots (109)$$

ただし,

$$F = \begin{bmatrix} f \\ \tau \end{bmatrix} \dots\dots\dots (110)$$

$$F_0 = \begin{bmatrix} f_0(x_g) \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (111)$$

$$K(x_g, \theta) = \begin{bmatrix} K_{fa}(x_g, \theta) & K_{fb}(x_g, \theta) & K'_{fa}(x_g, \theta) & K'_{fb}(x_g, \theta) \\ K_{ta}(x_g, \theta) & K_{tb}(x_g, \theta) & K'_{ta}(x_g, \theta) & K'_{tb}(x_g, \theta) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (112)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I'_a \\ I'_b \end{bmatrix} \dots\dots\dots (113)$$

これより、以下の式 (114) で表される制御則が得られる。

$$I = H(x_g, \theta)(F^* - F_0) \dots\dots\dots (114)$$

ただし、 $H(x_g, \theta)$ は $K(x_g, \theta)$ の疑似逆行列であり、以下の式 (115) で定義される。

$$H(x_g, \theta) = K(x_g, \theta)^\dagger = K(x_g, \theta)^T (K(x_g, \theta)K(x_g, \theta)^T)^{-1} \dots\dots\dots (115)$$

疑似逆行列の性質として、 E を単位行列とすると $K(x_g, \theta)H(x_g, \theta) = E$ が成り立つ。これにより得られる電流は、所望の推力とトルクを発生させる組み合わせの内、2乗和が最も小さな解となっている。

なお、 $K(x_g, \theta)$ の零空間に対応する電流は、推力とトルクに寄与しないことから、無効電流とまっている。式 (114) で得られる解は無効分を含まず、無効電流と直交している。

なお、図 17 に示す推力・トルク－電流変換器を用いることにより、推力とトルクの指令値 f^* 、 τ^* から各相の電流 I_a^* 、 I_b^* 、

I'_a *, I'_b *を求めることができる。

これにより、本発明のスパイラル型リニアモータでは、推力とトルクをそれぞれ独立して制御することができる。

5 本発明のスパイラル型リニアモータでは、タッチダウンを避けながら推力を発生させるために、トルクと推力の独立制御系の上位に、所望の推力に見合ったトルク目標値を与える目標値生成器を設ける。

スパイラル曲面の方程式は、進行方向を x 軸にとると、以下の式 (116) ~ (118) のように θ を媒介変数として記述される。

$$x = \ell_p \frac{\theta}{2\pi} \dots\dots\dots (116)$$

$$y = r \cos \theta \dots\dots\dots (117)$$

$$z = r \sin \theta \dots\dots\dots (118)$$

10 ただし、 ℓ_p はスパイラルのピッチである。すなわち、一周につき ℓ_p [m] 進むとする。このとき、半径 r の点でのスパイラル曲面の傾き $\tan \phi(r)$ は以下の式 (119) で与えられる。

$$\tan \phi(r) = \frac{\partial x}{\partial(r\theta)} = \frac{\ell_p}{2\pi r} \dots\dots\dots (119)$$

15 通常のねじと同様に、このスパイラル面に運動が拘束されるとき
の推力とトルクの関係は、以下のようにして求めることができる。

摩擦が全く存在しない場合、スパイラル面において、回転方向に加えられた力 δf_θ と、その力から垂直抗力を介して進行方向に作用する力 δf の関係は、図 18 で表され、以下の式 (120) で与えられる。

$$20 \quad \delta f = \frac{1}{\tan \phi(r)} \delta f_\theta = \frac{2\pi r}{\ell_p} \delta f_\theta \dots\dots\dots (120)$$

この両辺を δr で割って $\delta r \rightarrow 0$ とすると、以下の式 (121) で表される関係が得られる。

$$\frac{\partial f}{\partial r} = \left(\frac{2\pi r}{\ell_p} \right) \frac{\partial f_\theta}{\partial r} \dots\dots\dots (121)$$

一方、式 (37), (64) で求めたトルクから、上記の回転方向力の分布を求めることができ、推力とトルクの間係を導くことができる。

5 まず、式 (37), (64) で求めたトルクは、以下の式 (122) ~ (124) で表すことができる。

$$\tau = T(x_g, \theta) S_0 \dots\dots\dots (122)$$

$$= T(x_g, \theta) (r_2^2 - r_1^2) \dots\dots\dots (123)$$

ただし、

$$T(x_g, \theta) = \begin{cases} -4nB_r\ell_m \left(\frac{I_b}{-x_g + \ell_g + \ell_m} + \frac{I'_b}{x_g + \ell_g + \ell_m} \right) & \text{if } -(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta \\ 4nB_r\ell_m \left(\frac{I_a - I_b}{-x_g + \ell_g + \ell_m} + \frac{I'_a - I'_b}{x_g + \ell_g + \ell_m} \right) & \text{if } \alpha - \beta \leq \theta \leq \beta \end{cases} \dots\dots\dots (124)$$

半径 r から $r + \delta r$ の微小領域により発生されるトルク $\delta \tau$ は、上記式より以下の式 (125) で表すことができる。

$$\begin{aligned} \delta \tau &= T(x_g, \theta) ((r + \delta r)^2 - r^2) \\ &= T(x_g, \theta) (2r + \delta r) \delta r \dots\dots\dots (125) \end{aligned}$$

10

したがって、半径 r から $r + \delta r$ の微小領域により発生される回転方向力は、以下の式 (126) で表される。

$$\begin{aligned} \delta f_\theta &= \frac{\delta \tau}{r} \\ &= T(x_g, \theta) \frac{(2r + \delta r)}{r} \delta r \dots\dots\dots (126) \end{aligned}$$

これより中心から距離 r の点での半径方向に対する単位長さ当たり

の回転力は、以下の式（１２７）で与えられる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_{\theta}}{\partial r} &= \lim_{\delta r \rightarrow 0} \frac{\delta f_{\theta}}{\delta r} \\ &= \lim_{\delta r \rightarrow 0} T(x_g, \theta) \frac{(2r + \delta r)}{r} \\ &= 2T(x_g, \theta) \dots\dots\dots (127)\end{aligned}$$

したがって、運動がスパイラル面に拘束される場合の推進力は、式（１２１），（１２７）により以下の式（１２８），（１２９）となる。

5

$$\begin{aligned}f &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{\partial f}{\partial r} dr \\ &= \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{2\pi r}{\ell_p} \right) \frac{\partial f_{\theta}}{\partial r} dr \\ &= \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{2\pi r}{\ell_p} \right) (2T(x_g, \theta)) dr \\ &= \frac{2\pi}{\ell_p} T(x_g, \theta) (r_2^2 - r_1^2) \\ &= \frac{2\pi}{\ell_p} T(x_g, \theta) S_0 \\ &= \frac{2\pi}{\ell_p} \tau \dots\dots\dots (128)\end{aligned}$$

となる。すなわち、

$$\tau = \frac{\ell_p}{2\pi} f \dots\dots\dots (129)$$

理想状態では、発生さえるトルクと推力の目標値は上記式の関係を満たすように与える必要がある。

この関係は、仮想仕事の原理からも求めることができる。すなわち、式（１１６）の両辺を時間微分したて得られる、以下の式（１３０）の方程式

10

$$\dot{x}_g = \left(\frac{\ell_p}{2\pi} \right) \dot{\theta} \dots\dots\dots (130)$$

及び、瞬時パワーが保持される以下の式（１３１）で表される制約式を解いても求めることができる。

$$\dot{x}_g f = \dot{\theta} \tau \dots\dots\dots (131)$$

本発明のスパイラル型リニアモータでは、回転子がタッチダウンしないように、常にギャップ x_g を零に制御する必要がある。そこで、
5 回転子の質量を M とすると、以下の式（１３２）で表される、２重積分型となる回転子のダイナミクス

$$M\ddot{x}_g = f \dots\dots\dots (132)$$

に対して、安定化補償器（レギュレータ）の設計を行うことで制御
10 することができる。

上式を伝達関数表現すると、以下の式（１３３）で表される。

$$x_g = \frac{1}{Ms^2} f \dots\dots\dots (133)$$

安定化補償器 $C_g(s)$ は、以下の式（１３４）によりギャップ制御を行う。

$$f = -C_g(s)x_g \dots\dots\dots (134)$$

安定化補償器 $C_g(s)$ の設計は、PI 制御、状態フィードバック + オブザーバ、 H_∞ 制御など、様々な手法を適用することができる。

次に、推力制御について説明する。図 19 は推力制御系のブロック図であり、図 20 は推力制御系の詳細ブロック図である。

20 図 19 において、トルク目標値発生器 10 は、前記式（１２９）に基づいて、推力の指令値からトルクと推力の目標値（ τ^* , f^* ）を求め、推力－電流変換器 11 に入力する。また、推力－電流変換器 11 には、スパイラル型リニアモータ 1 に設けたギャップセンサ

から求めたギャップ値 x_g を用いて得た $f_0(x_g)$ が負帰還される。
 また、ギャップ制御器 15 は、前記式 (134) に基づいて安定化補償を行う。

5 推力-電流変換器 11 は、トルク目標値発生器 10 からのトルク目標値 τ^* 、推力の目標値 f^* と、 $f_0(x_g)$ 、及びギャップ値 x_g 、回転子の回転角 θ を用い、式 (114) に基づいて電流指令値 (I_a^* , I_b^* , $I_a'^*$, $I_b'^*$) を求め、電流制御器 12 に入力する。

電流制御器 12 は、推力-電流変換器 11 からの電流指令値 (I_a^* , I_b^* , $I_a'^*$, $I_b'^*$) と、固定子の巻き線に供給される電流値 (I_a , I_b , I_a' , I_b') とに基づいて、PI 制御を行い
 10 電圧値 (V_a , V_b , V_a' , V_b') を形成する。インバータ 13 はこの電圧指令値に基づいて電源 14 から電力を固定子の巻き線に供給する。

また、本発明のスパイラル型リニアモータをアクチュエータに適
 15 用し、このアクチュエータにより位置決めを行う場合には、前記した推力制御系の上位に位置制御系を設ける。

以下、位置制御系について説明する。

ギャップが零に制御されていると仮定すると、回転子の並進位置は回転角によって一意に決定される。したがって、回転子の回転角
 20 を制御することにより、回転子の並進位置を制御することができる。

回転子の慣性モーメントを J とすると、回転子に運動方程式は、以下の式 (135) で与えられる。

$$J\ddot{\theta} = \tau \dots\dots\dots (135)$$

式 (116), (129) の関係を用いて式 (135) を書き換えると、以下の式において、
 25

$$\widetilde{M}\ddot{x} = f \dots\dots\dots (136)$$

と表すことができる。ただし、 \widetilde{M} は等価慣性であり、

$$\widetilde{M} = \frac{4\pi^2}{\ell_p^2} J$$

で与えられる。

したがって、式（136）の2重積分制御対象に対して、サーボ制御系の設計を行うロバストサーボ制御等が有効である。

5 図21は位置制御系のブロック図であり、図22は位置制御系の詳細ブロック図である。

図示する位置制御系では、前記した推力制御系の上に位置制御器16を備える。位置制御器16は、位置指令値 x^{cmd} と回転子の回転角 θ を入力してその偏差を求め、求めた位置偏差に基づいてサーボ制御により推力の指令値を求め、推力制御系のトルク目標値発生器10に入力する。

15 本発明のスパイラル型リニアモータによれば、回転しながら軸方向に推力を発生することができ、推力を発生する部分をスパイラル型とすることで減速ギアと同様の効果により、高い推力を得ることができる。

また、回転子と固定子のピッチを小さくすることにより、高回転型とすることができ、小型化及び軽量化することができる。

また、ギヤと異なり、回転子と固定子は非接触であり摩擦がないため、ロスやバックラッシュを除くことができる。

20 また、静止摩擦がないため、高精度な位置決めが可能であり、NC機械などの精密位置決め装置に好適である。

産業上の利用可能性

本発明のスパイラル型リニアモータは、小型軽量、高精度、高推力が同時に求められる精密位置決め装置に好適である。

請 求 の 範 囲

1. 中心軸と当該中心軸の外周に設けたらせん状部とを備える回転子と、

前記回転子と同ピッチのらせん状の中空磁極を備える固定子とを備え、

前記回転子の中心軸を前記固定子の中空磁極内とし、前記回転子のらせん状部を前記固定子の中空磁極のらせん状の溝内においてらせん状に回転自在とし、前記回転子は前記固定子に対してらせん状に回転しながら軸方向に直動することを特徴とする、スパイラル型リニアモータ。

2. 前記回転子は、前記らせん状部のらせん側面に永久磁石を備えることを特徴とする、請求の範囲第1項に記載のスパイラル型リニアモータ。

3. 前記固定子は、前記中空磁極のらせん状の両側面に互いに90度位相をずらした2相の巻き線を軸方向に巻回することを特徴とする、請求の範囲第1項に記載のスパイラル型リニアモータ。

4. 前記固定子は、前記中空磁極のらせん状の両側面にスロットを備え、当該スロットに前記巻き線を巻回することを特徴とする、請求の範囲第1項に記載のスパイラル型リニアモータ。

補正書の請求の範囲

[2004年2月17日(17.02.04)国際事務局受理 : 出願当初の
請求の範囲1は補正された。他の請求の範囲は変更なし。(1頁)]

請 求 の 範 囲

1. (補正後) 中心軸と当該中心軸の外周に径方向に突出したらせん状部とを備える回転子と、
前記回転子と同じピッチのらせん状の溝を有する中空磁極を備える固定子とを備え、
5 前記回転子の中心軸を前記固定子の中空磁極内とし、前記回転子のらせん状部の軸方向側面と前記固定子のらせん状溝の軸方向側面とを対向させ、中空磁極のらせん状の溝内においてらせん状に回転自在とし、前記回転子は前記固定子に対してらせん状に回転しながら軸方向に直動することを特徴とする、スパイラル型リニアモータ。
10
2. 前記回転子は、前記らせん状部のらせん側面に永久磁石を備えることを特徴とする、請求の範囲第1項に記載のスパイラル型リニアモータ。
- 15 3. 前記固定子は、前記中空磁極のらせん状の両側面に互いに90度位相をずらした2相の巻き線を軸方向に巻回することを特徴とする、請求の範囲第1項に記載のスパイラル型リニアモータ。
4. 前記固定子は、前記中空磁極のらせん状の両側面にスロットを備え、当該スロットに前記巻き線を巻回することを特徴とする、請求の範囲第1項に記載のスパイラル型リニアモータ。
20

条約第 19 条 (1) に基づく説明書

請求の範囲第 1 項は、ステータとロータのらせん状部分の側面どうしが中心軸の軸方向で対向する構成を明確にした。

なお、この補正は、例えば第 2 頁第 18 行～第 3 頁第 2 行、第 1 図及び第 5 頁第 23 行～第 6 頁第 6 行、第 8 図及び第 8 頁第 8 行～第 21 行の記載内容に基づくものである。

引用される文献の中で特に関連性があるとされる引用文献 1 (JP 10-257751) (シーケーディ株式会社) は、雄側磁気ネジ 1 が軸芯をなすロッド 2 に N 極着磁帯 4 が形成された磁石が覆装されたものであり、また、引用文献 2 (日本国実用新案登録出願 60-127580 号 (日本実用トン案登録出願公開 62-38080 号) の願書に添付した明細書及び図面の内容を撮影したマイクロフィルム (日立造船株式会社) は、回転体 4 に形成されるらせん溝は固定体 2 側の外らせん溝 6 と共に転がり軸受け用のボールを配設する溝を構成するものであり、また、引用文献 3 (JP 57-501458 (オデスキイ・ポリテクニチエスキイ・インスチチュート) は、ステータとロータに形成されたらせん状の突極を、その周方向の面を対向させるものである。

そして、上記各引用文献 1～3 のいずれも、ステータとロータのらせん状部分の側面どうしを軸方向で対向させる構成ものではない。そのため、これら引用文献の構成では、磁束は進行方向 (軸方向) と垂直な方向に出入りする大きな推力を得ることはできない。

これに対して、本発明は、上記構成を備えることにより、巻き線及び磁石のいずれの磁束も進行方向 (軸方向) であり、また、磁束が通じる面積が大きくなるため、大きな推力が発生するという作用効果を得ることができる。

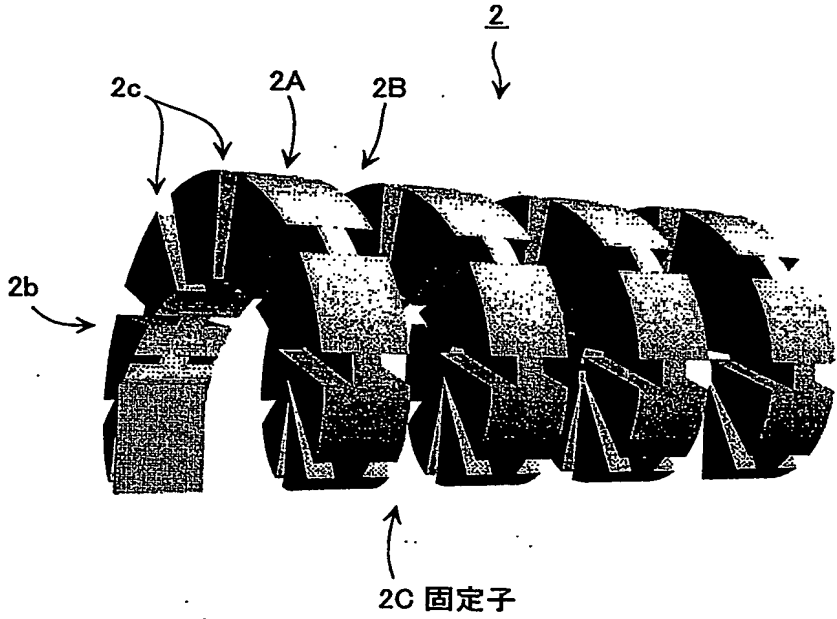
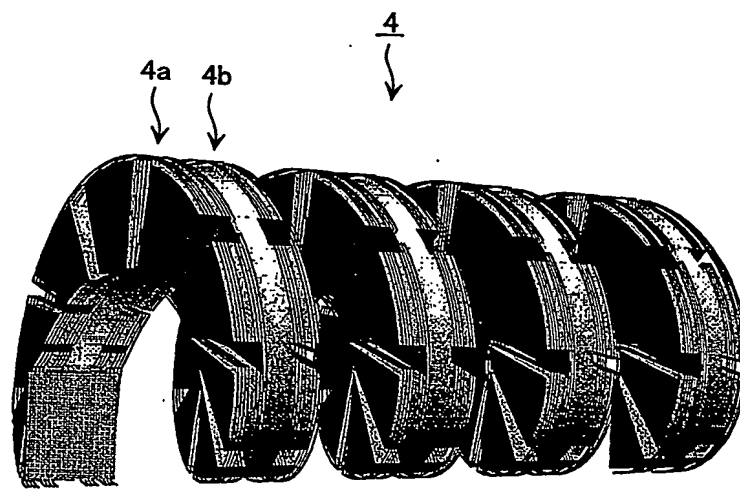


FIG. 1

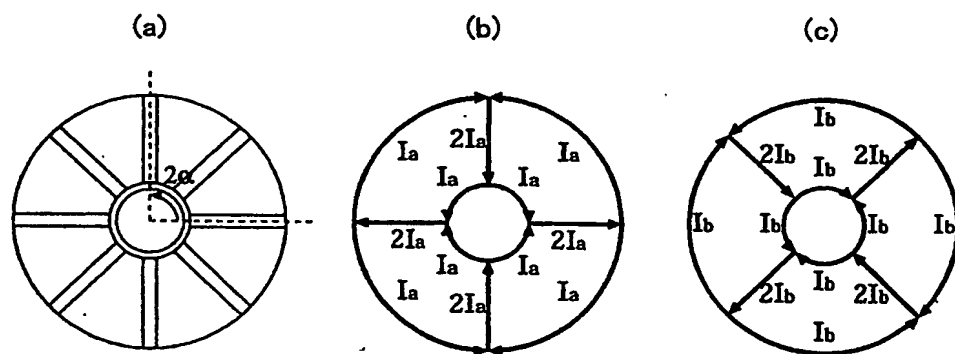
2 / 2 2



巻線を巻いた固定子

FIG. 2

3 / 2 2



固定子と巻線の軸方向投影図

FIG. 3

4 / 2 2

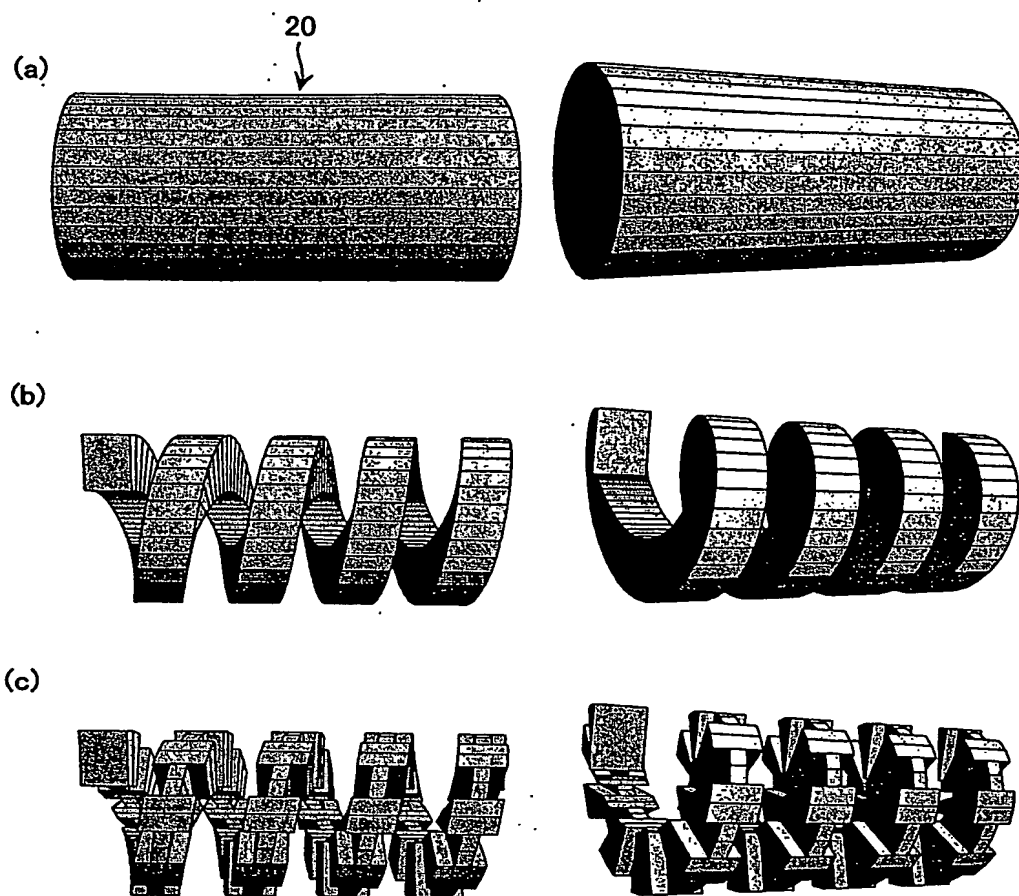
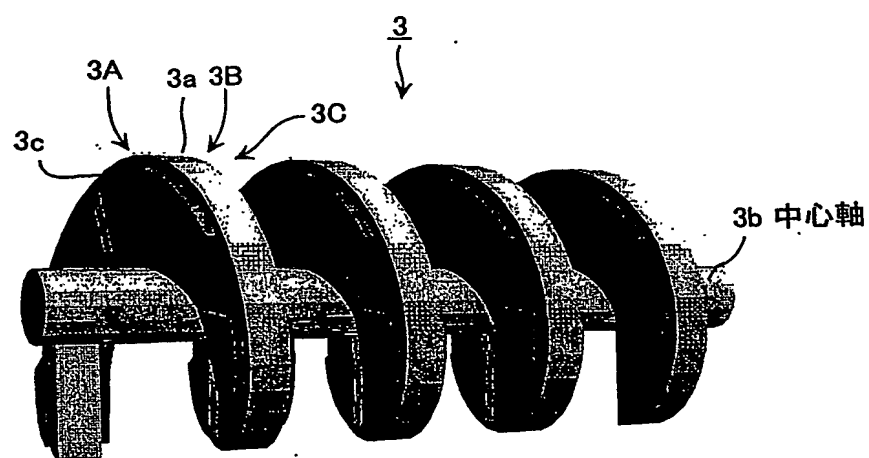


FIG. 4

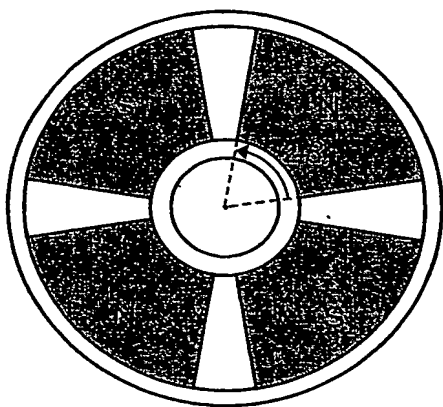
5 / 2 2



回転子

FIG. 5

6 / 2 2



回転子の軸方向投影図

FIG. 6

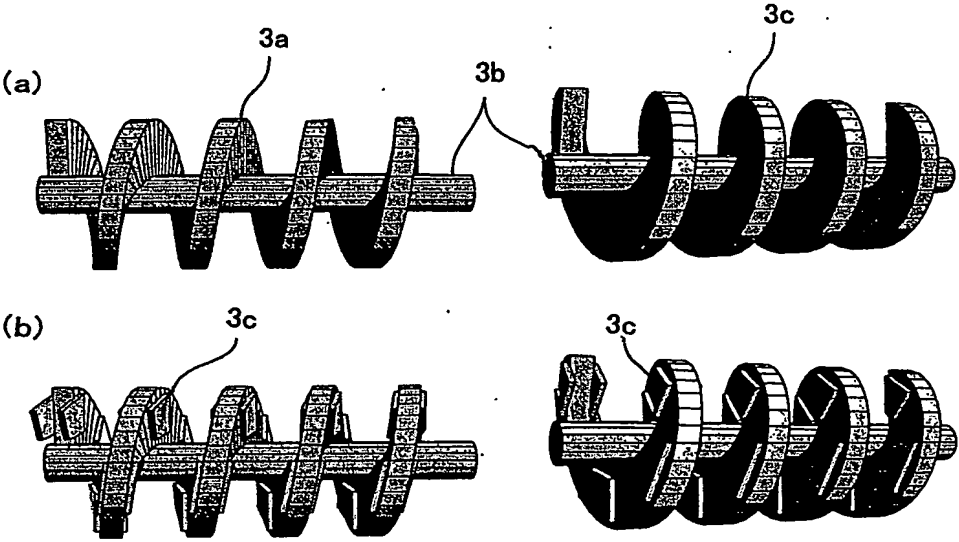
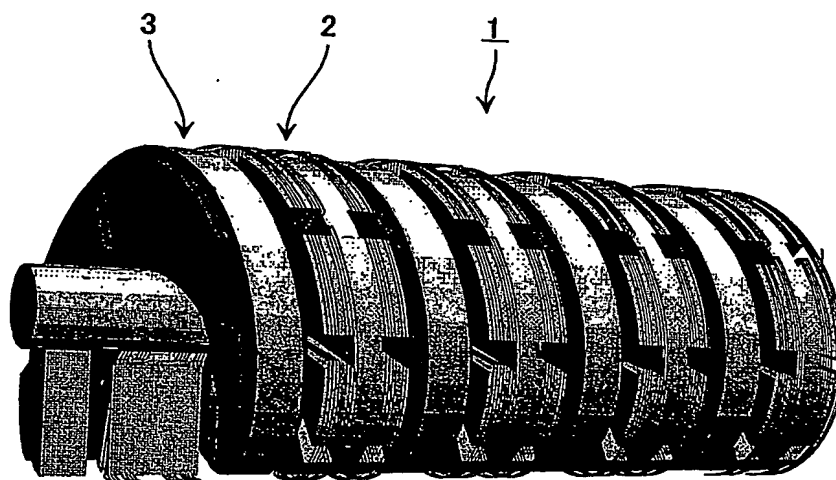


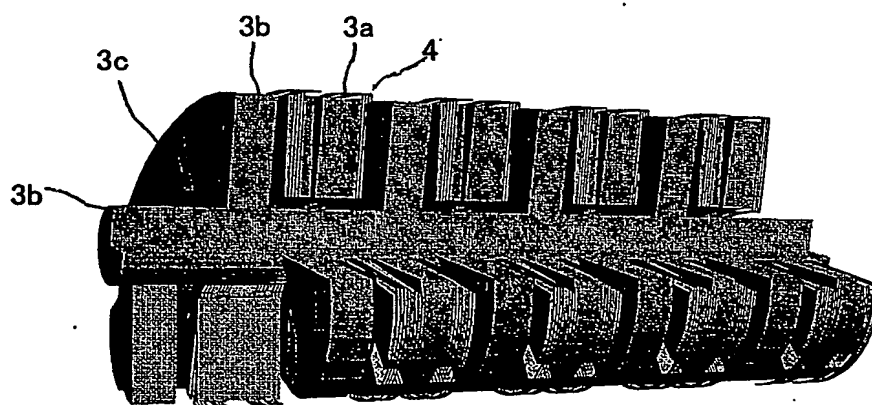
FIG. 7

8 / 22



スパイラルモータの固定子と回転子

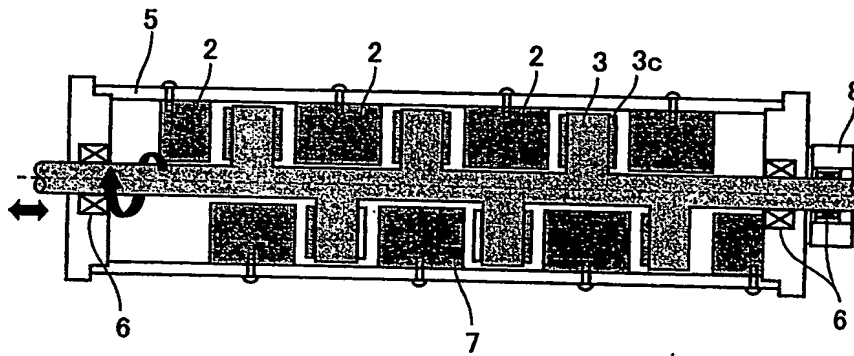
FIG. 8



スパイラルモータのカットモデル

FIG. 9

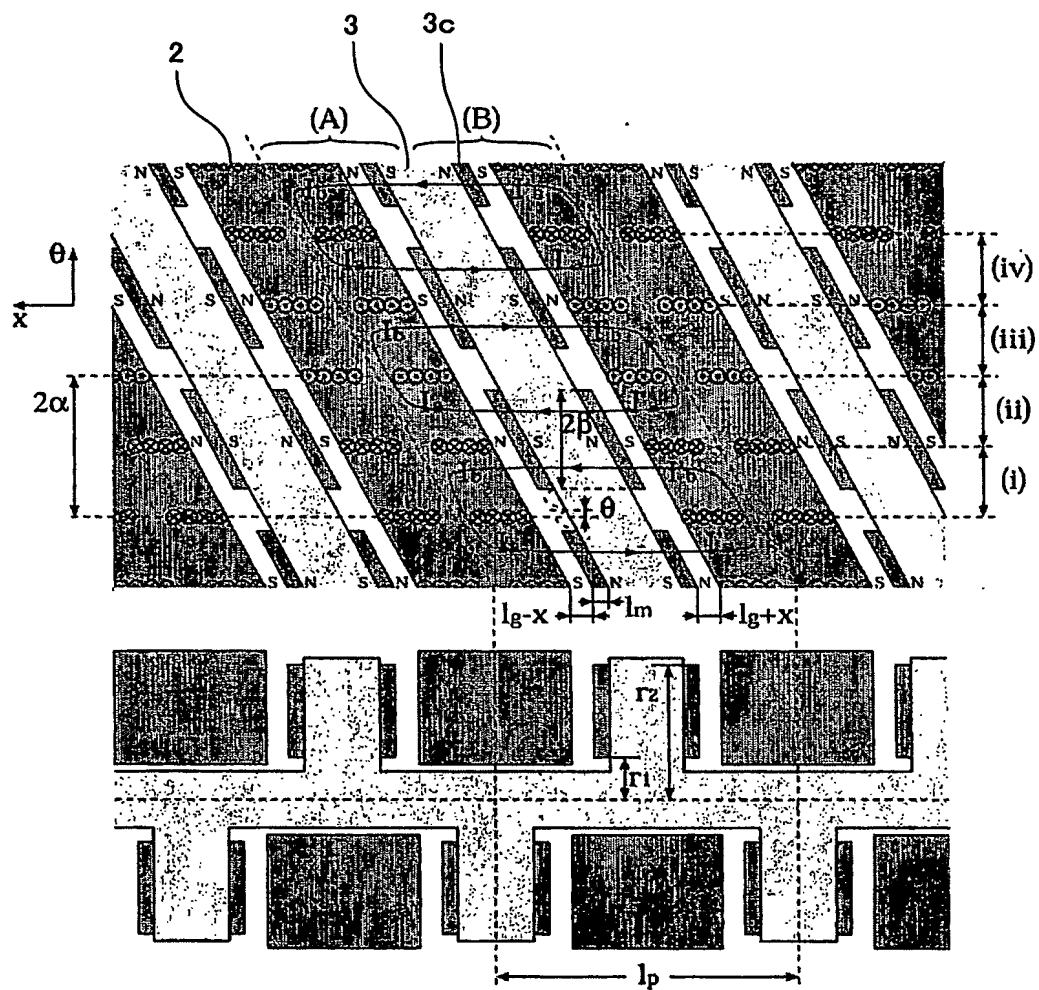
10/22



スパイラルモータの縦断面図

FIG. 10

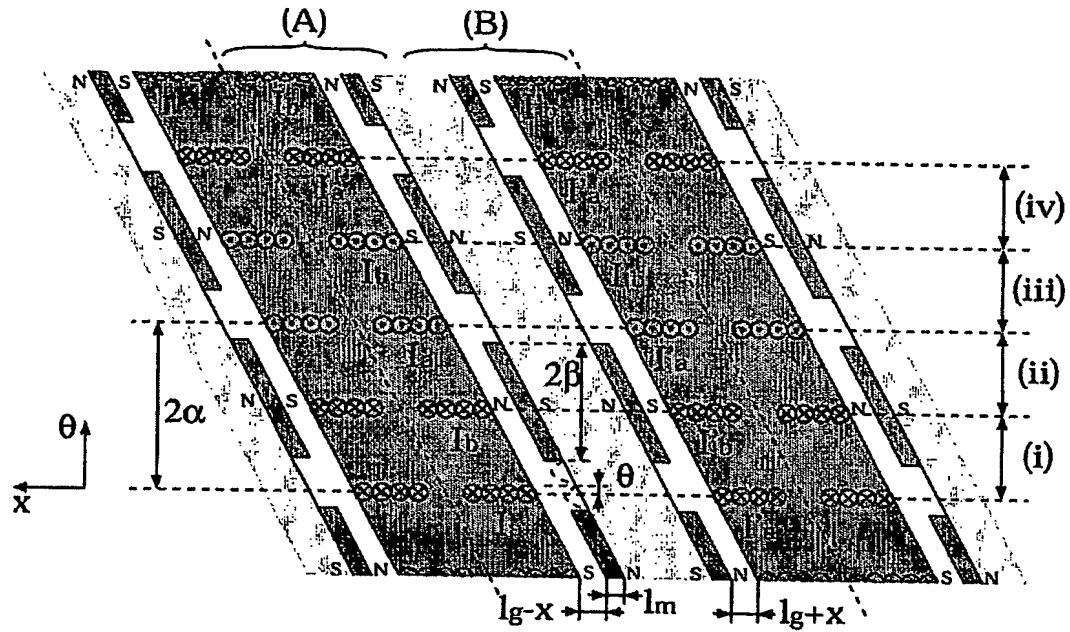
11/22



極座標展開図

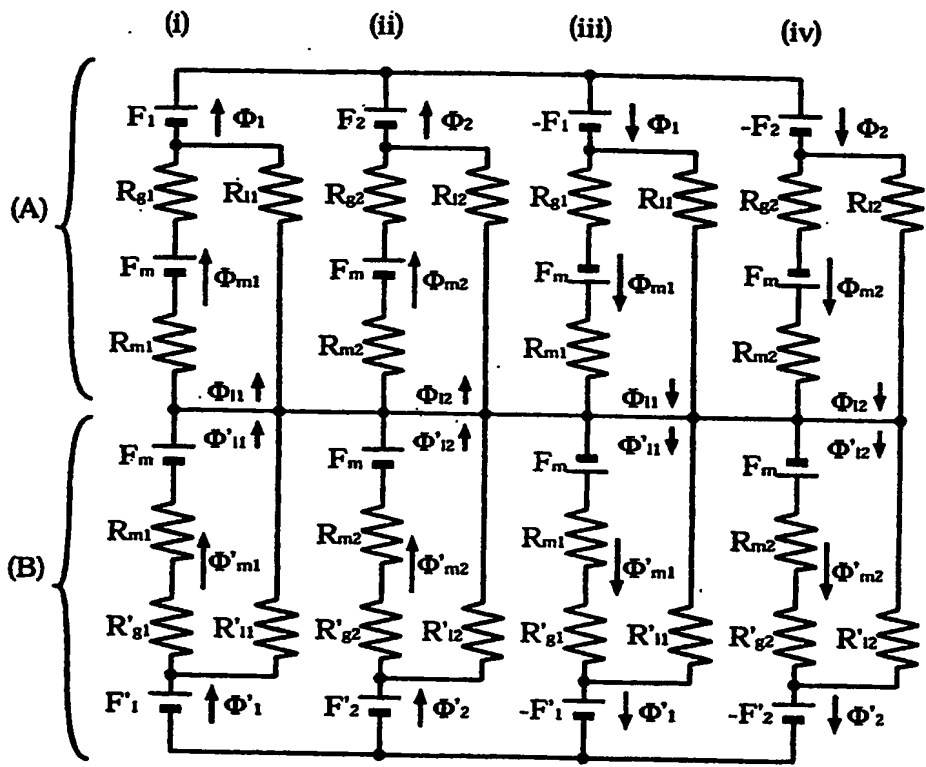
FIG. 11

12 / 22



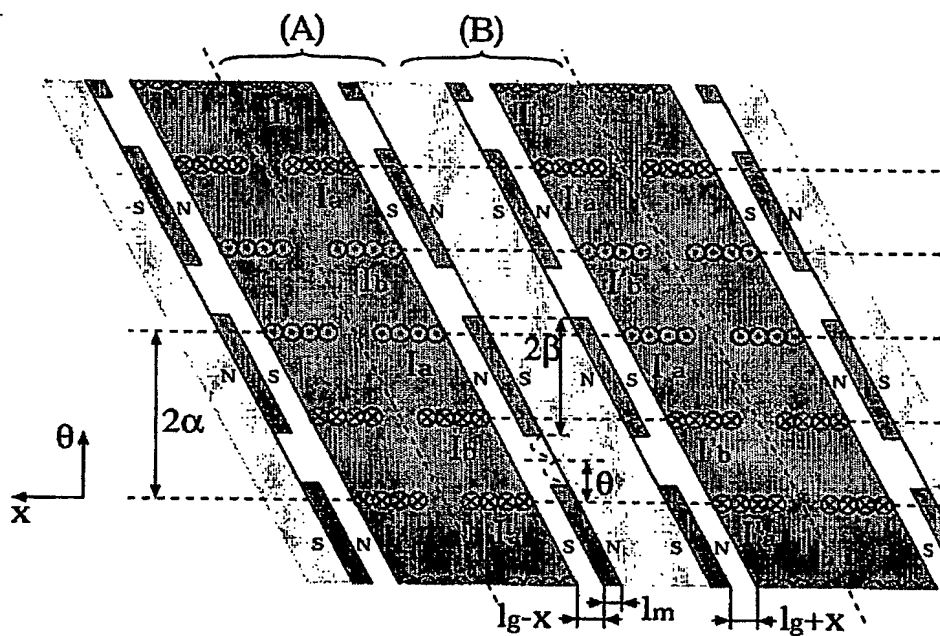
モード 1 ($-(\alpha - \beta) \leq \theta \leq \alpha - \beta$) の場合

FIG. 12



モード1の等価磁気回路

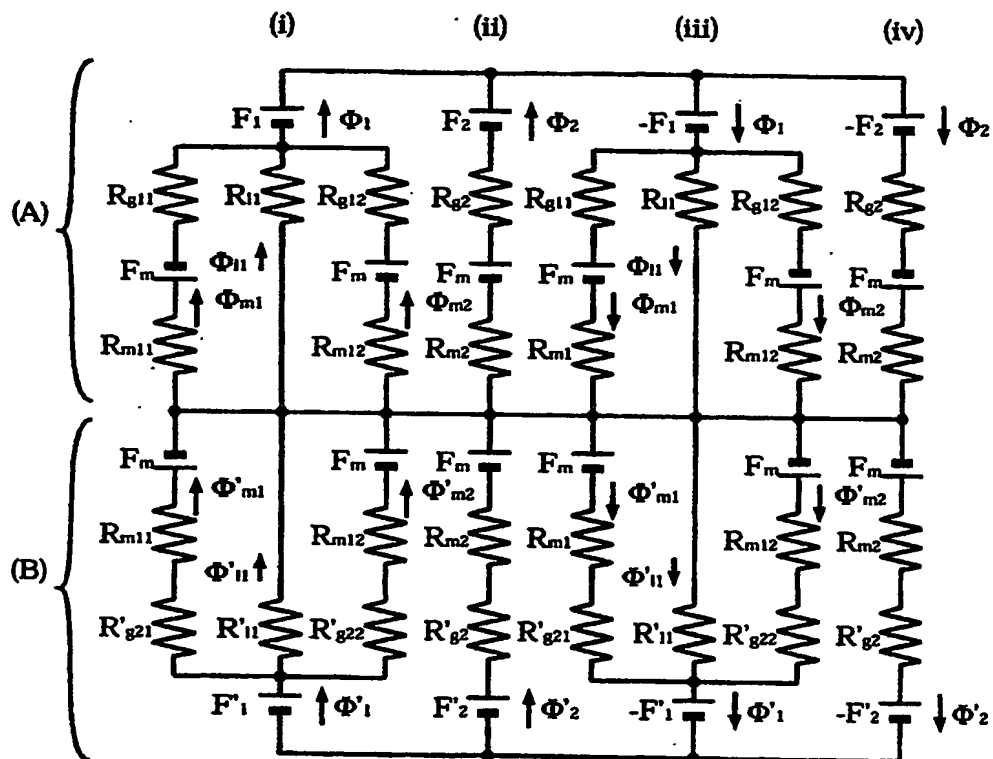
FIG. 13



モード $2(\alpha - \beta \leq \theta \leq \beta)$ の場合

FIG. 14

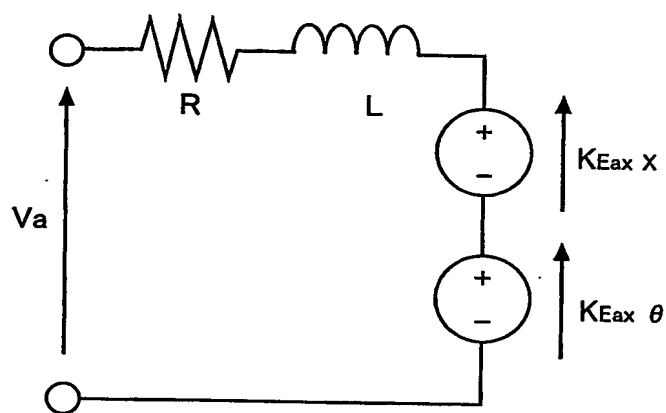
15 / 22



モード2の等価磁気回路

FIG. 15

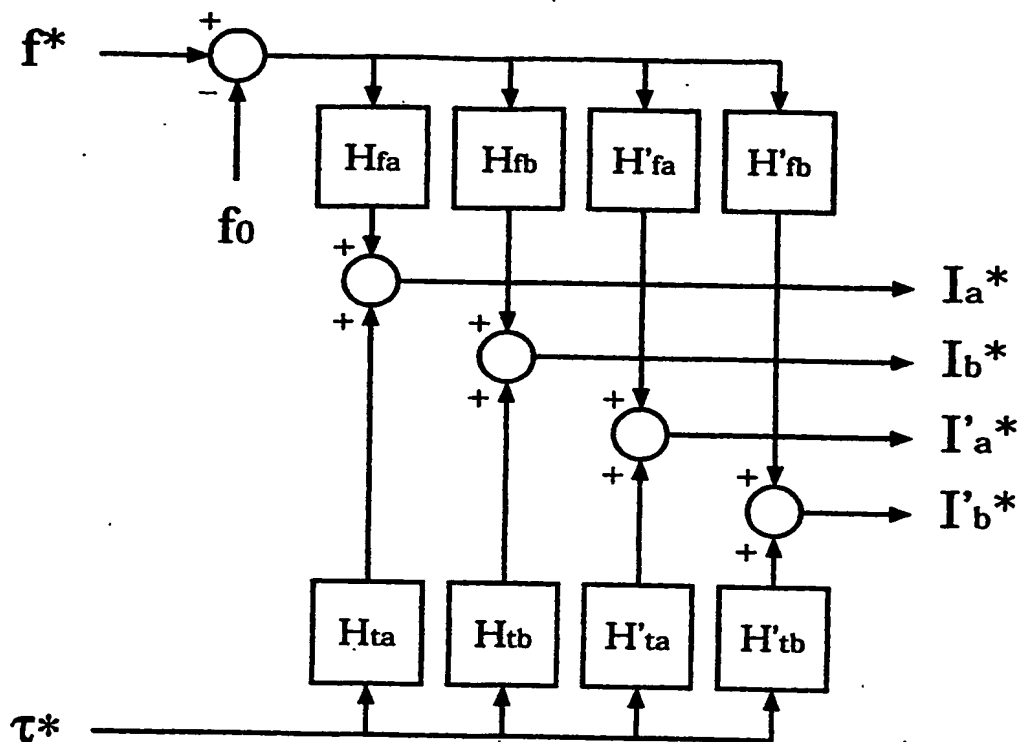
16 / 22



電機子回路

FIG. 16

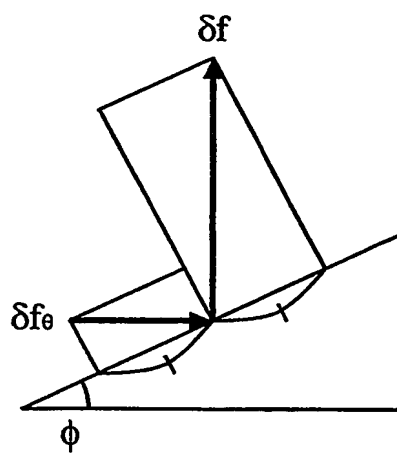
17 / 22



推力・トルク-電流変換器

FIG. 17

18 / 22



ねじの原理

FIG. 18

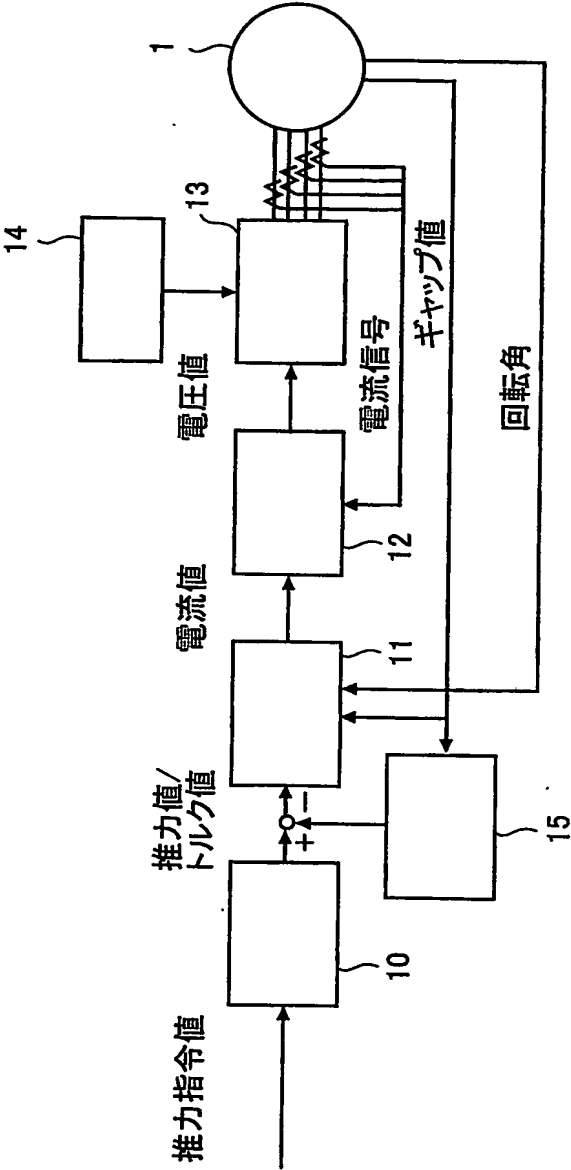
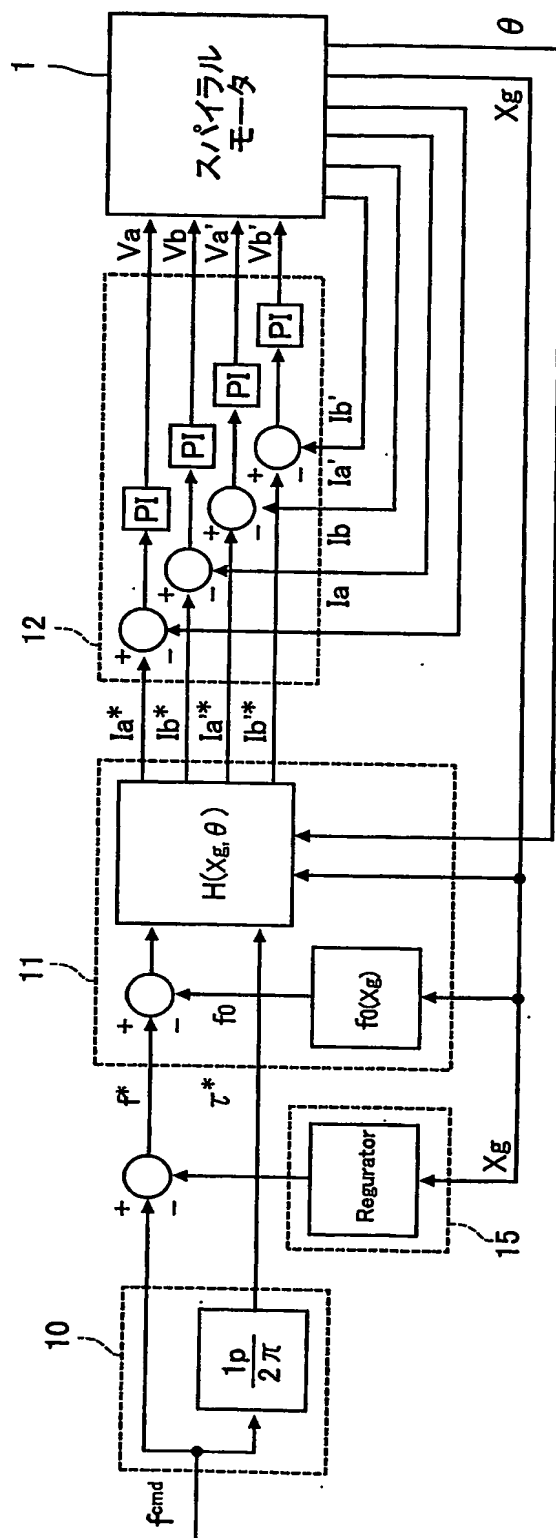


FIG. 19



細詳の力制御推

FIG. 20

21 / 22

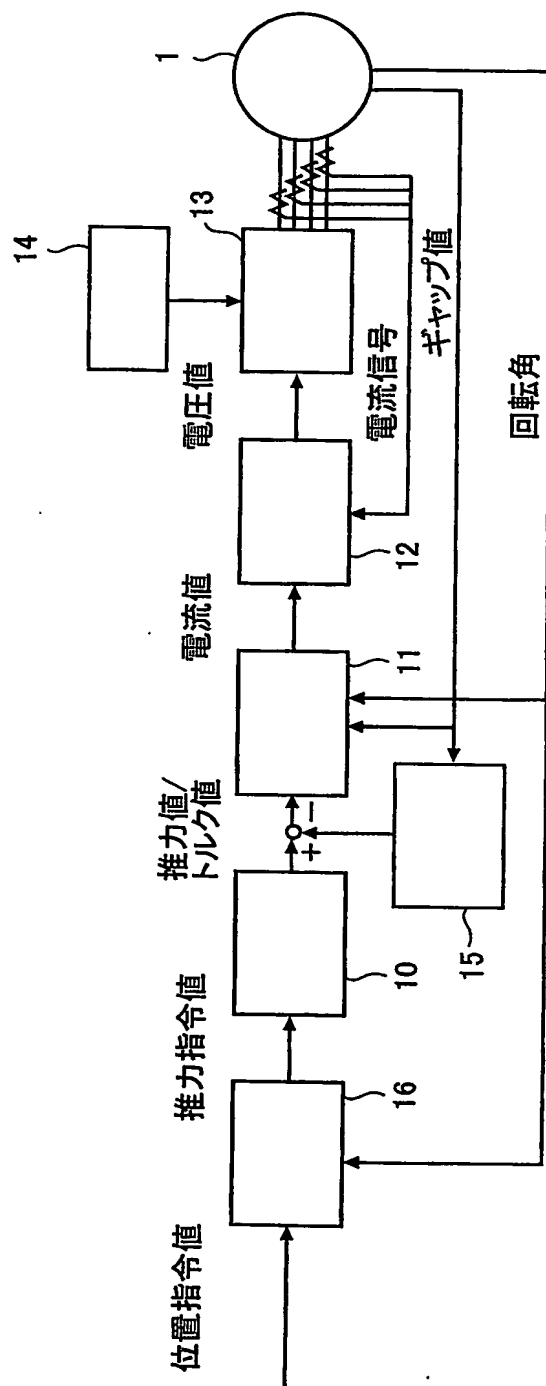
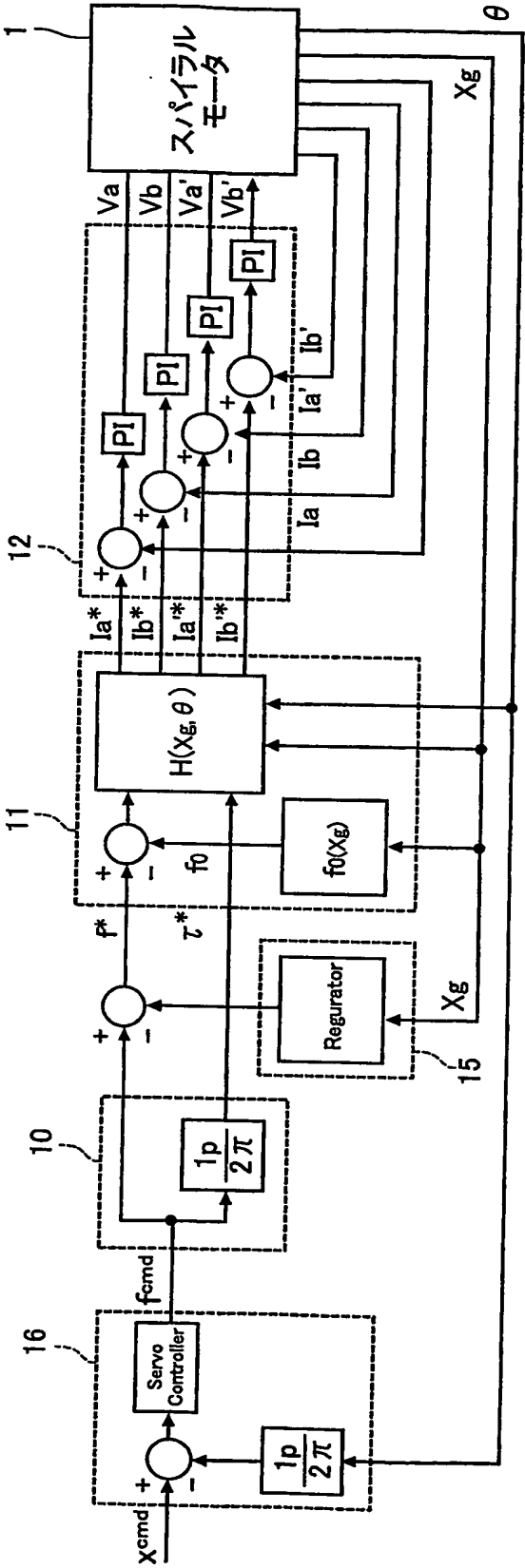


FIG. 21



位置制御系の詳細

FIG. 22

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/13646

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ H02K41/03

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ H02K41/00, 1/00, 21/00, 37/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2003
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2003	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2003

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 10-257751 A (CKD Kabushiki Kaisha), 25 September, 1998 (25.09.98), Full text; all drawings (Family: none)	1 2-4
X A	Microfilm of the specification and drawings annexed to the request of Japanese Utility Model Application No. 127580/1985 (Laid-open No. 38080/1987) (Hitachi Zosen Corp.), 06 March, 1987 (06.03.87), Full text; all drawings (Family: none)	1 2-4

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* "A" "E" "L" "O" "P"	Special categories of cited documents: document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance earlier document but published on or after the international filing date document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" "X" "Y" "&"	later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art document member of the same patent family
--------------------------------------	---	--------------------------	---

Date of the actual completion of the international search
19 December, 2003 (19.12.03)

Date of mailing of the international search report
20 January, 2004 (20.01.04)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/13646

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 57-501458 A (Odessky Politekhnicheskyy Institut), 12 August, 1982 (12.08.82), Full text; all drawings & WO 82/01286 A1	1 2-4
A	JP 8-163857 A (Oriental Motor Co., Ltd.), 21 June, 1996 (21.06.96), Full text; all drawings (Family: none)	1-4
A	CD-ROM of the specification and drawings annexed to the request of Japanese Utility Model Application No. 41875/1993 (Laid-open No. 9061/1995) (Yaskawa Electric Corp.), 07 February, 1995 (07.02.95), Full text; all drawings (Family: none)	1-4
A	JP 6-225513 A (Toyoda Automatic Loom Works, Ltd.), 12 August, 1994 (12.08.94), Full text; all drawings (Family: none)	1-4

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl.⁷ H02K41/03

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl.⁷ H02K41/00, 1/00, 21/00, 37/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2003年
 日本国登録実用新案公報 1994-2003年
 日本国実用新案登録公報 1996-2003年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X A	JP 10-257751 A (シーケーディ株式会社) 1998. 09. 25, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 2-4
X A	日本国実用新案登録出願60-127580号 (日本国実用新案登録出願公開62-38080号) の願書に添付した明細書及び図面 の内容を撮影したマイクロフィルム (日立造船株式会社) 1987. 03. 06, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 2-4

☒ C欄の続きにも文献が列举されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

19. 12. 03

国際調査報告の発送日

20. 1. 2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

佐々木 訓



3V

9818

電話番号 03-3581-1101 内線 3356

C (続き). 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X A	JP 57-501458 A (オデスキイ・ポリテクニチエスキ イ・インスチチュート), 1982. 08. 12, 全文, 全図 & WO 82/01286 A1	1 2-4
A	JP 8-163857 A (オリエンタルモーター株式会社) 1996. 06. 21, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-4
A	日本国実用新案登録出願5-41875号 (日本国実用新案登録出 願公開7-9061号) の願書に添付した明細書及び図面の内容を 記録したCD-ROM (株式会社安川電機), 1995. 02. 0 7, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-4
A	JP 6-225513 A (株式会社豊田自動織機製作所) 1994. 08. 12, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-4

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.